



## Lagring af flis - Svind og perkolat

Skov, Simon; Andersen, Katrine

*Publication date:*  
2018

*Document version*  
Også kaldet Forlagets PDF

*Citation for published version (APA):*  
Skov, S., & Andersen, K. (2018). *Lagring af flis - Svind og perkolat*. Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet. IGN Rapport



# Lagring af flis – Svind og perkolat

Simon Skov og Katrine Andersen

IGN Rapport  
December 2018

**Titel**

Lagring af flis – Svind og perkolat

**Forfattere**

Simon Skov og Katrine Andersen

**Bedes citeret**

Simon Skov og Katrine Andersen (2018): Lagring af flis – Svind og perkolat. IGN Rapport, december 2018, Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Frederiksberg. 45 s. ill.

**Udgiver**

Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning  
Københavns Universitet  
Rolighedsvej 23  
1958 Frederiksberg C  
ign@ign.ku.dk  
www.ign.ku.dk

**Ansvarshavende redaktør**

Claus Beier

**ISBN**

978-87-7903-802-8 (web)

**Omslag**

Jette Alsing Larsen

**Forsidefoto**

Simon Skov

**Publicering**

Rapporten er publiceret på [www.ign.ku.dk](http://www.ign.ku.dk)

**Finansiering**

Dansk Fjernvarmes F&U-projekt 2016-05  
Hadsund fjernvarme  
Lindenberg Skovselskab  
Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning

**Gengivelse er tilladt med tydelig kildeangivelse**

Skriftlig tilladelse kræves, hvis man vil bruge instituttets navn og/eller dele af denne rapport i sammenhæng med salg og reklame

## Resumé

Alle der arbejder med flis har en fornemmelse af, at flisstakke opfører sig forskelligt. Under lagring opstår der varme i midten af stakken, som tørrer. Stakkene damper af og til så meget, at det bliver anmeldt som brand.

Processerne ændrer flisen, der ligger i stak. Typisk bliver midten mere tør, mens toppen og siderne bliver vådere. Processerne drives af mikrobiel omsætning, der samtidig nedbryder flisen. Under lagring opstår der et svind af tørstof og typisk en lavere vandprocent.

Ovenstående processer påvirkes af fliskvaliteten, stakstørrelsen, lagringstiden, osv.

Projektets formål er at undersøge, om det samlet set kan betale sig at overdække flisstakke med presenning. Og sekundært at afklare om der dannes perkolat under flisstakke. Hvis der siver vand gennem stakke undersøges, hvilke mængder og indholdsstoffer, der forekommer.

Projektet bygger på et feltarbejde udført hos Hadsund Fjernvarme med høj-kvalitetsflis fra Lindensborg Skovselskab. Tre stakke sammenlignes, hhv. hvid flis med og uden presenning og en stak med grøn, ikke fortørret, flis uden presenning. Stakkene blev lagret i gennemsnitligt 7 måneder.

Svindet blev målt med flere metoder. Hver metode har styrker og svagheder og resultaterne er ikke helt sammenfaldende. Alle indgående læs blev vejet på brovægten og flisprøver blev tørret og vejet, jf. normal praksis. Som ekstra måling efter lagring blev alt flis vejet på brovægten mellem lageret og lempegraven. Igen blev der udtaget prøver til tørring. Herefter kunne ændringer i vandindhold og tørstof beregnes.

Svindet blev også målt ved begravede sække med flis. Flis med kendt vægt og vandindhold blev placeret på bestemte steder i stakken og genvejet efter lagring.

Der findes et svind i tørstof på ca. 1% pr. måned.

Der er ikke væsentlig gevinst ved brug af presenning, så det vurderes, at indkøb og håndtering ikke kan betale sig.

Der er indsamlet perkolat (gennemsivende vand) i spande, der er indsat i transekter fra kanten til midten af stakkene. Det viser sig, at der dannes perkolat under flisstakke. Mængden og positionen er meget varierende, men der er fundet perkolat fra yderst til inderst i stakkene. I løbet af 4 måneder er der opsamlet, hvad der svarer til 140 ml perkolat /m<sup>2</sup> om måneden. Indholdet i det rene ufortyndede perkolat overholder i alle tilfælde kravene til industrispildevand til kloak, men overskrider kravene til overfladevand eller nedsivning til grundvand.

Det iagttages, at perkolatet bevæger sig ned gennem stakkene i snoende "nedløbsrør" af opfugtet flis. "Nedløbsrørene" ligner de "skorstene", som leder varm luft og damp ud af flisstakke.



## Indhold

Resumé .....	3
Forord .....	5
Mange tak .....	6
Begreber .....	6
Formål og projektbeskrivelse.....	8
Sædvanlig praksis.....	8
Undersøgelse af svind og perkolat .....	9
Fliskvalitet .....	11
Selvopvarmning i stakkene .....	12
Svind.....	13
Forsøgsdesign .....	13
Sække .....	13
Vognlæs .....	15
Vand- og tørstofprocenter.....	15
Variation i vandmålingerne.....	17
Sække .....	18
Tværsnit .....	25
Brændværdi .....	26
Energitab.....	27
Konklusion – vandindhold og svind .....	29
Perkolat.....	31
Perkolatdannelse .....	31
Forsøgsdesign .....	32
Perkolat i de tre stakke .....	33
Perkolatmængde .....	34
Perkolatvandkemi .....	37
Konklusion – perkolat .....	42
Appendix 1 .....	44

## Forord

Flis lagres ofte i store stakke enten hos producenten eller forbrugeren. Lagringen kan være nødvendig for at kompensere for tidsforskydningen mellem produktionen og forbruget. Lagring kan også ske ud fra producentens ønske om at ændre flisens kvalitet eller forbrugers ønske om høj forsyningssikkerhed.

Det er velkendt, at processerne i en stak afhænger af flisens kvalitet og fysiske forhold som stakstørrelse, presenning mv. Mikrobiel omsætning vil medføre en opvarmning af stakkens indre, mens stakkens ydre vil blive påvirket af vejr og vind. Der vil som tommelfingerregel ske en tørring af de indre dele, mens de øverste og yderste dele vil blive vådere. Opvarmningen drives af nedbrydningsprocesser, hvilket medfører, at mængden af flis i stakken bliver mindre.

I praksis er det meget svært at opgøre disse ændringer idet stakkens volumen ændrer sig som følge af tættere pakning af flisen. Vægten af stakken falder som følge af tørstof-tab og tørring. Energiindholdet stiger som følge af tørring, men falder som følge af tørstof-tab. Endelig forventes det, at flisen har en konstant brændværdi (J/kg).

På trods af, at lagring er en udbredt praksis, så er samspillet mellem alle de nævnte processer mangelfuldt undersøgt. Litteraturen om emnet er sparsom og uklar. Et af problemerne er, at undersøgelserne er vanskelige at udføre, og at hver case-undersøgelse beror på de aktuelle forhold som fliskvalitet, vejr og klima. Der er således en del undersøgelser, der ikke kan overføres til danske forhold, fx undersøgelser fra Nordsverige, som omhandler birkeflis lagret i stærk frost.

I forbindelse med miljøgodkendelsen af store flislagre er det ofte overvejet, hvordan en flisstak påvirker afstrømningen af vand fra pladsen. Også dette spørgsmål er vanskeligt at besvare og dårligt belyst i litteraturen.

Den almindelige opfattelse er, at der ikke siver vand ned gennem en flisstak, men at vandet, der fx falder som regn på stakken løber ned ad overfladen. Det er gængs opfattelse, at vandet forhindres i at løbe lodret ned gennem stakken pga. varmen i stakkens midte og den tag-effekt, som det yderste lag udgør.

Som beskrevet i projektansøgningen, er det ikke realistisk at gennemføre en undersøgelse med meget høj præcision inden for det meget begrænsede budget. Projektet har snarere karakter af en pilotundersøgelse. Den store indsats fra Hadsund Fjernvarme opvejer dog delvist det begrænsede budget og giver alligevel undersøgelsens resultater en vis tyngde.

## Mange tak

Projektet er finansieret af Dansk Fjernvarme, Hadsund Fjernvarme, Lindenberg Skovselskab og IGN-KU.

Finansieringen af dette projekt er naturligvis afgørende for, at arbejdet er gennemført. Derfor skal Dansk Fjernvarmes F&U-pulje, Lindenberg Skovselskab og Hadsund Fjernvarme have tak for at prioritere projektet, og derved bidrage til bedre viden om flislagring.

Hadsund Fjernvarme har gjort en meget stor indsats for at udføre undersøgelserne. Især de mange vejninger og tørringer er en helt central del af projektet. Mange tak for den store og gode indsats.



Billede 1: Hadsund Fjernvarme har maskiner til at håndtere flis. Her ses gummiged med aggregat til opskubning af flis. (Foto: Simon Skov)

## Begreber

Der anvendes en række enheder og begreber i rapporten.

Vandprocenter i biomasse beregnes som  $(\text{våd-tør}) \times 100/\text{våd}$ . Dvs. vandprocenten beregnes på basis af den våde flis. Denne formel afviger fra normal praksis når det drejer sig om vandindhold i tømmer, som beregnes på tør basis.

Tørstof er den del af flisen, der ikke er vand. Det er tørstoffet, der indeholder den energi, som udløses, når flisen brændes. Tørstof måles i vægt, fx i tons.

Nedre brændværdi er tørstoffets energiindhold fratrukket fordampningsvarmen for det vand, som flisen indeholder. Brændværdi måles i energi/vægt, fx GJ/ton.

”Energi” bruges om den samlede energi, som findes fx i en stak. Energien påvirkes dels af flisens nedre brændværdi, hvilket hovedsageligt bestemmes af flisens vandprocent, men også af stakkens størrelse. Energien beregnes som brændværdien (Gj/t) gange mængden (ton). Enheden er joule, fx Gj.

Svind er en negativ ændring, der opstår ved lagring. Der sker flere ændringer med flisen under lagring. Hvis flisen tørrer, stiger den nedre brændværdi. Den energi, som mikroorganismerne omsætter til vækst og varme, kommer fra flisens tørstof, som der på grund af omsætningen bliver mindre af. Det er således realistisk, at flisen tørrer under lagring, men at den samlede mængde flis bliver mindre. Det er to energi-faktorer, der peget i hver sin retning. Analysen af ændringer under lagring skal derfor opdeles i vandprocenter, tørstof og energiindhold.

Volumen er ikke en enhed, der bruges i denne rapport. Volumen kan som udgangspunkt ikke bruges i sammenhæng med flis. Under lagring bliver flisen komprimeret i betydelig grad. Det er helt almindeligt, at den løse flis, som stakken opbygges af, bliver til en meget hård og kompakt masse, som en gummiged kun vanskeligt kan løsne. Også under transport ændrer flisens volumen sig. Volumen, fx rummeter, er derfor ikke et egnet mål for flismængde.



Billede 2: Komprimeret flis. Efter lagring er flisen hård og kompakt og stakkens volumen er reduceret i forhold til den oprindelige størrelse. (Foto: Simon Skov)



## Formål og projektbeskrivelse

Projektets hovedformål er at undersøge om lagring under presenning er fordelagtig i forhold til lagring uden presenning og at sammenligne lagring af grøn flis med hvid flis.

Det er også projektets formål at undersøge om der dannes perkolat i en flisstak. Perkolat er vand, der siver gennem stakken og ud af bunden. I bekræftende fald, i hvilken mængde dannes perkolatet og hvilke stofkoncentrationer indeholder det?

## Sædvanlig praksis

Hadsund Fjernvarme opkøber flis om sommeren og har det på lager til fyringssæsonen. Den sædvanlige praksis har været at stakke flisen op i ca. 8 meters højde og dække stakken med presenning. Presenningen dækker stakken på nær et par meter nederst på begge siden. På ryggen af stakken skæres en række huller på ca. 40 cm Ø.

Flisen produceres af Lindenberg Skovselskab og vurderes at være grov brændselsflis af meget høj kvalitet, med høj andel af ved, lavt indhold af bark og nåle og lav smuldprocent.

Sædvanligvis bygges stakkene op på værkets plads hen over sommeren, hvor produktionen af flis i skovene overstiger forbruget på varmeværkerne. Stakkene øger forsynings sikkerheden ved at gøre værket uafhængig af daglige leverancer fra skoven. Produktionen af flis og transport fra stakke i skoven kan forhindres af dårlige føre. Flisen fra stakkene brændes hen over vinteren.

Når flisen leveres, vejes læsset ind på brovægten og der udtages en prøve i en spand. Prøven vejes og tørres på traditionel vis. Rutinen for indvejning og tørring blev også benyttet i forsøgsperioden.



Billede 3: Opbygning af en flisstak. (Foto: Simon Skov)



## Undersøgelse af svind og perkolat

Projektet bygges op omkring tre forsøgstakke hos Hadsund Varmeværk. Disse stakke vejes og analyseres på flere måder som beskrevet under overskriften "Svind". Undersøgelsen af perkolatdannelse udføres ved at begrave rækker af spande, der kan tømmes for indhold ved stakkenes overflade, som beskrevet under overskriften "Perkolat".

De tre forsøgstakke er fælles for de to delprojekter.

For at undersøge effekten af lagring med og uden presenning samt sammenligne lagring af hvid og grøn flis, blev der opbygget tre langstrakte flisstakke. En stak af hvid flis uden presenning, en stak af hvid flis med presenning (sort plastikdug fra DLG) og en stak af grøn flis uden presenning. Den sædvanlig presenningspraksis hos Hadsund Fjernvarme og Lindensborg Skovselskab er at dække toppen og ca. 2/3 af siderne med presenning. I toppen skæres huller i presenningen, så evt. damp kan slippe ud. Ved en fejl og i modsætning til normal praksis, så blev presenningen ført hele vejen ned ad stakken til jorden og fastholdt med flis langs stakkens kant. Der blev skåret huller i presenningen langs toppen af stakken.

Følgende forkortelse bliver anvendt i denne rapport:

- u= Hvid flis uden presenning
- p= Hvid flis med presenning
- g= Grøn flis uden presenning

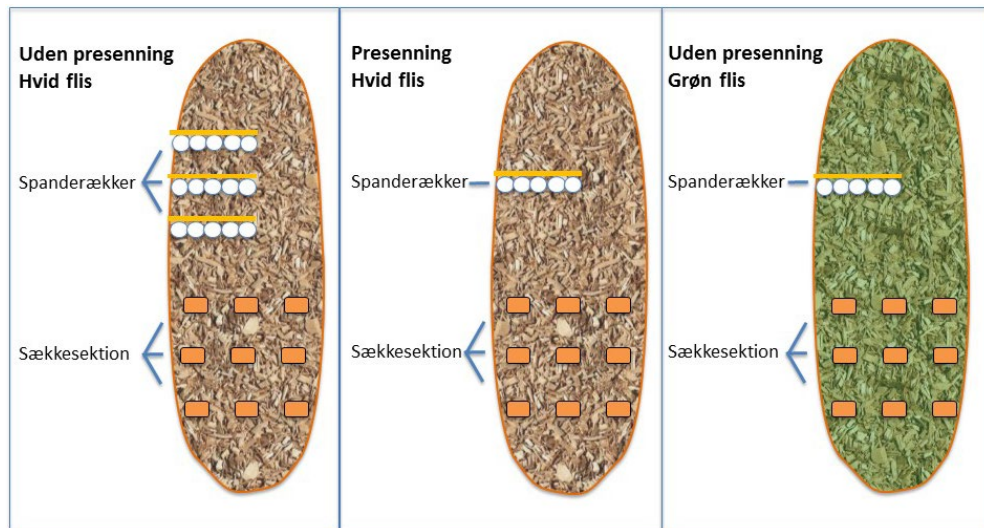
Stakkene blev opbygget i perioden fra d. 9/6 2016 til d. 9/9 2016, og blev gradvist kørt ud af pladsen og brændt på varmekærket i perioden fra d. 20/2 2017 til d. 24/3 2017. Flisen blev altså lagret mellem 5,5 og 9,5 måned (tabel 1).

**Tabel 1: Dimensioner og lagringstid for flisstakke**

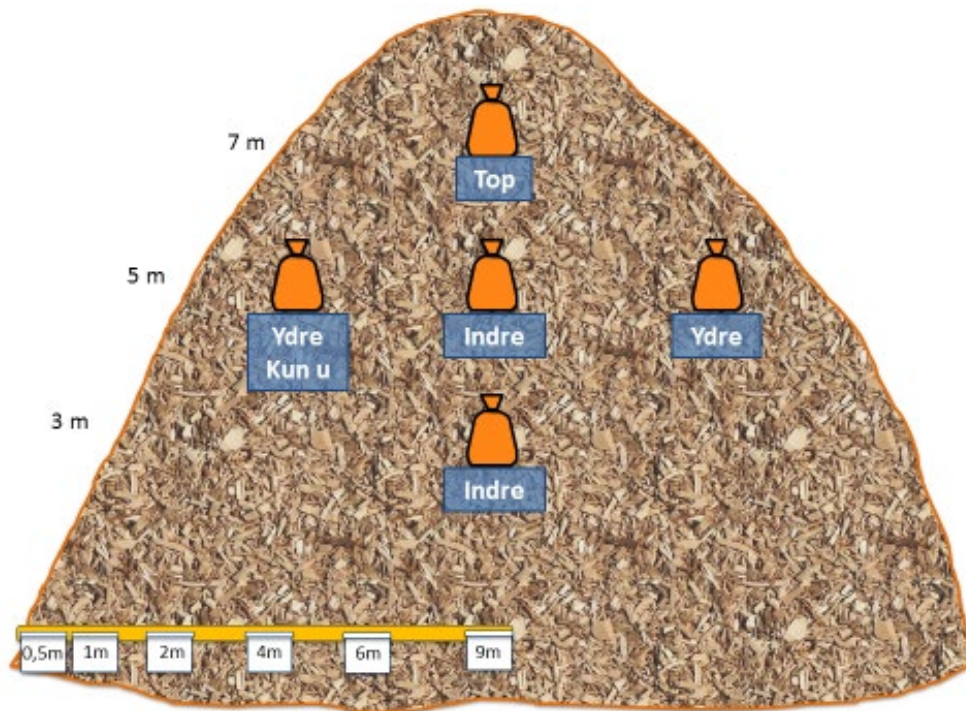
Stak	Højde (m)	Bredde (m)	Bygget (dato)	Brændt (dato)	Lagringstid (interval)
u	7,4	Ca. 18	9/6-9/9 2016	6/3-24/3 2017	5 mdr. og 25 dage (178 dage) - 9 mdr. og 15 dage (288 dage)
p	7,3	Ca. 18	9/6-8/9 2016	20/2-6/3 2017	5 mdr. og 12 dage (165 dage) - 8 mdr. og 25 dage (270 dage)
g	8	Ca. 18	14/6-9/9 2016	20/2-6/3 2017	5 mdr. og 11 dage (164 dage) - 8 mdr. og 20 dage (265 dage)

Der blev lagt vægt på, at de to stakke med hvid flis indeholdte den samme kvalitet. Af denne grund blev flis-chaufføren nøje instrueret i at læsse hvert andet læs af i hver stak. Vejesedlerne fra brovægten skulle samtidig henføres til den rigtige stak. På den måde blev det sikret, at stakkene fra start indeholdt flis af samme kvalitet, og at den aflæssede mængde var kendt.

Den grønne stak blev etableret ved at producere den ønskede mængde flis af friske, ikke fortørrede, træer.



Figur 1: Oversigt over transekter/ rækker af spande og sektioner med sække i de tre flisstakke.



Figur 2: Flisestak i profil. Figuren viser omtrent placering af spanderækken og sække i en sektion. Ikke målefast. Indre, ydre og top, angiver hvilke sække der repræsenterer hhv. den indre del, den ydre del og toppen af stakken.





Billede 4: Presenningen holdes nede med en kant af flis. Desuden holdes presenningen fast med jernstænger og finérplader. Som det ses på billedet, så er stænger og plader blæst af og presenningen delvist gået i stykker. Ud over indkøb og oplægning, så er det et arbejde at vedligeholde og bortskaffe presenningen.



Billede 5: En flisstak med presenning (ikke hos Hadsund Fjernvarme). Der ses ventilationshuller i toppen af stakken og en blottet ende til bortkørsel. (Foto: Simon Skov)

## Fliskvalitet

Visuelt vurderet, så er flisen fra Lindenberg Skovselskab af meget høj kvalitet i forhold til lagringsegenskaberne. Der er stor andel grove partikler, lille andel fine partikler, høj andel ved, lavt indhold nåle og bark.

Den grønne stak er lavet af flis, der ikke er fortørret, men hugget i grøn tilstand. I forhold til typisk grøn flis fra andre leverandører, så har denne grønne flis en høj kvalitet som beskrevet for hvid flis.

Fliskvaliteten blev dokumenteret ved soldning efter VB160-metoden.

Både for hvid og grøn flis var soldningsresultatet, at flisen opfylder kravene for grov brændselsflis.

Resultaterne for soldning af hvid og grøn flis kan ses i appendix 1.



Billede 6: Grøn flis er særligt fremstillet hos Lindenberg Skovselskab og leveret hos Hadsund Fjernvarme.

### Selvopvarmning i stakkene

De processer, der nedbryder flis under lagring og derved medfører svind og flytter vandet i stakken, danner varme. Generelt opnår midten af store flisstakke en temperatur på 60-70 °C relativt kort tid efter opstakning. Varmedeviklingen afhænger af flere faktorer, hvoraf partikelstørrelsen, ved-andelen, fugtigheden og ilttilgangen er blandt de vigtigste.

Det var planen at måle temperaturen i stakkene med Hadsund Fjernvarmes trådløse temperaturspyd, men desværre viste det sig, at de ikke virkede, og derfor er der ingen målinger af temperaturen. I øvrigt er en spydmåling i toppen af stakken kun en svag indikation på kernetemperaturen.

Der blev iagttaget damp fra toppen af stakkene, så der var en vis varmedevikling. Da stakkene blev åbnet til brug, blev det erfaret, at ingen af stakkene var varme i traditionel forstand. Den grønne stak var lidt lun og stak P og U var ikke mærkbart varme.

Den ringe varmeudvikling hænger formodentlig sammen med den høje fliskvalitet. Resultaterne fra projektet skal ses i denne sammenhæng. Det er sandsynligt, at resultaterne havde været anderledes, hvis fliskvaliteten havde været dårligere, så stakkene blev varme.

## Svind

### Forsøgsdesign

Der anlægges to lige store stakke med skovflis. Stakkene er langstrakte og ca. 8 meter høje. Flisen er klassificeret som grov brændselsflis jf. VB160 og er høj-kvalitet skovflis af fortørrede træer. Kvaliteten er valgt, så den svarer til sædvanlig drift på Hadsund Fjernvarme. Hen over sommeren bliver de flislæs med den største andel bark, kviste og nåle kørt direkte i læssegraven til forbrænding, mens de bedste læs med den største andel ved, bliver lagt i stak.

Flisen leveres direkte fra produktionsstedet og læsses skiftevis af i den ene og den anden stak af hvid flis. Derved fordeles de forskellige flis-partier ligeligt i de to stakke. Lindenberg Skovselskab leverer al flisen.

Den ene stak tildækkes med presenning efter opbygningen.

Desuden blev der opbygget en mindre stak af grøn flis. Flisen blev særligt produceret af nyfældede træer, og var derfor grøn. Efter tørring var kvaliteten ikke væsentlig anderledes i den grønne stak end i de to andre stakke.

Ændringer i vand-, tørstof- og energiindhold over lagringsperioden undersøges på to måder:

- **Sække:** Netsække med flis, placeres i stakkene under opbygningen. Sækkenes indhold og vandprocent kendes før lagring og måles igen, når sækken findes efter lagring.
- **Vognlæs:** Vejning af den totale mængde flis kørt til og kørt fra hver stak. Hver vejning hører sammen med en tørreprøve.

### Sække

Under opbygning indbygges netsækkene i stakken på bestemte placeringer i forhold til stakkens profil. Det forventes, at stakken i løbet af lagringen får en tør midte, en fugtig overflade og en våd top. For at vise denne udvikling placeres sækkene, så de repræsenterer disse dele af stakken (figur 2).

Alle sækkene fyldes med flis af samme kvalitet, hvilket opnås ved at blande en mindre stak flis godt sammen på pladsen med en minigraver. Når flisen er homogeniseret udtages prøver til både vandbestemmelse og soldning. Derefter bliver nylonsække fyldt med flis, lukket og nummereret. Sækkene vejes og placeres i stakken, hvorefter opbygningen af stakken fortsættes.



I forbindelse med, at flisstakken bliver nedbrudt og kørt ind til forbrænding bliver sækkene fundet. Der var på forhånd stor tvivl om, hvorvidt sækkene ville blive fundet og i så fald, om de ville blive revet i stykker af grabben. Alle sække blev fundet og kun én var gået i stykker. Straks efter at en sæk var fundet, blev den båret ned i veje-/tørrerummet og vejet. Derefter åbnedes sækken og en prøve blev udtaget til tørring.

Metoden er et forsøg på at imødegå det vanskelige spørgsmål om flisens samlede vægt. Sækkenes vægt er nemmere at bestemme end hele stakkens vægt. Ulempen ved metoden er, at ændringer under lagringen kun giver en lille forskel på vejningerne før og efter, idet sækkens vægt kun er 6-8 kg. Der må forventes en vis usikkerhed på vejningen af sækkene.

I den efterfølgende beregning af det samlede svind i stakkene bliver det antaget, at volumenfordelingen af den indre del, den ydre del og toppen af stakken er som følger:

- Indre: 75 %
- Ydre: 15 %
- Top: 10 %



Billede 7; En netsæk indbygges i flisstakken. Markeringsstrimmel øger chancen for at maskinføreren finder sækken uden at grave hul i den. (Foto: Simon Skov)

## Vognlæs

Stakkene blev også målt i vognlæs. Al flis blev vejlet ind og vandbestemt jævnfør værkets normale rutine. Hver leveret containerfuld blev vejlet og der bliver udtaget en prøve til tørring. Alle vejsesedler henføres til den stak som flisen læsses af i.

Efter lagring blev flisen gravet ud af stakken. Værkets rutine er, at stakkene nedbrydes med en gummiged, som læsser flis op i en tipvogn, der kører det til læssegraven. I anledning af forsøget blev samtlige vognlæs vejlet på brovægten og der blev taget en prøve af flisen til vandbestemmelse.

Samlet set, så er flisstrømmen altså beskrevet ved at alle vognlæs ind og ud af stakkene er vejlet og vandbestemt.

## Vand- og tørstofprocenter

I relation til projektets begrænsede størrelse, så opnås der er relativt komplekst datasæt. Nedenstående tabeller præsenterer centrale måleresultater.

**Tabel 2: Oversigt over målinger af flisens vandindhold før og efter lagring. "Før" og "Efter" angiver om målingerne er foretaget før eller efter lagring i stak. For vandprocenter målt i vognlæs er målingerne før lagring foretaget pr. container. Efter lagring er målingerne foretaget for hver af de mindre traktorvognlæs.**

### Vandprocenter målt i vognlæs

Stak	Antal målinger	Gns. vandpct. (%)	Min. vandpct. (%)	Maks. vandpct. (%)	Stdafv. af vandpct.
<b>Før</b>	<b>157</b>	<b>37,7</b>	<b>23,6</b>	<b>51,0</b>	<b>5,8</b>
<b>p</b>	59	36,5	26,9	51,0	5,7
<b>u</b>	60	36,2	23,6	47,0	5,7
<b>g</b>	38	42,1	34,4	48,3	3,3
<b>Efter</b>	<b>365</b>	<b>39,2</b>	<b>22,3</b>	<b>60,6</b>	<b>7,6</b>
<b>p</b>	138	33,9	22,3	49,8	4,4
<b>u</b>	137	41,5	24,3	59,8	7,4
<b>g</b>	90	44,1	27,9	60,6	6,7

### Vandprocenter målt i sække

Stak	Antal målinger	Gns. vandpct. (%)	Min. vandpct. (%)	Maks. vandpct. (%)	Stdafv. af vandpct.
<b>Før</b>	<b>12</b>	<b>41,0</b>	<b>37,7</b>	<b>45,1</b>	<b>1,8</b>
<b>p+u</b>	6	41,1	39,9	45,1	2,0
<b>g</b>	6	40,8	37,7	42,6	1,8
<b>Efter</b>	<b>38</b>	<b>32,9</b>	<b>23,8</b>	<b>60,2</b>	<b>7,4</b>
<b>p</b>	12	30,0	23,9	43,2	4,8
<b>u</b>	14	36,1	23,8	60,2	10,3
<b>g</b>	12	31,9	26,6	41,3	3,9

Sammenlignes antallet af målinger ses det, at der er langt flest målinger for vognlæs. Især er der mange traktor-vognlæs efter lagring. Resultaterne for vandprocentmålingerne fra vognlæs- og sækkeundersøgelsen er ikke ens. Forskellene illustrerer, at det er vanskeligt at håndtere så store mængder flis på en præcis måde. Der må dog lægges en betydelig tillid i de mange vognlæs-målinger.

Resultaterne fra vognlæs-undersøgelsen viser, at der før lagring er fundet samme vandindhold i de to stakke med hvid flis. Et gennemsnitligt vandindhold på 36% er lavt for skovflis. Den grønne stak er lidt vådere med 42% målt i vognlæssene. Den tilsvarende måling i sække-undersøgelsen viser et højere vandindhold i de hvide stakke og viser ingen forskel mellem den hvide og grønne flis. Både hvid og grøn flis måles til ca. 41 % med sække-metoden.

Efter lagringen viser vognlæs-målingerne forskel på stakkene: p-stakken (med presenning) er blevet tørrere, g-stakken (med friskhugget flis) er blevet lidt vådere, mens u-stakken (uden presenning) er blevet vådere.

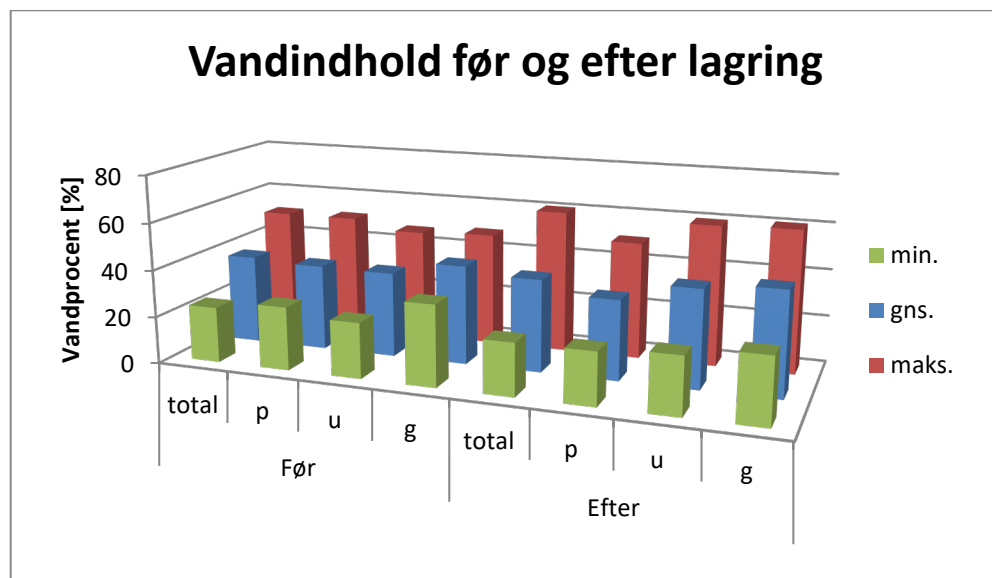
Sække-undersøgelsen viser ikke samme resultat, hverken i udviklingstendens eller i absolutte tal. Det hænger sammen med den store forskel i start-vandindhold, og med, at sækkenes placering giver en antalsmæssig fordeling, der ikke svarer til det pågældende områdes volumen. Det er nødvendigt at tage hensyn til sækkenes placering for at sammenligne resultaterne.



Billede 8: En flisstak graves ud og læsses i traktor-vogn til vejning. (Foto: Simon Skov)

### Variation i vandmålingerne

En af udfordringerne ved analyse af lagring, er variationen i vandprocenterne. Nedenstående figur (figur 3) viser minimum, gennemsnitligt og maksimumvandindhold og er en grafisk visning af data fra tabel 2.



Figur 3: Minimum, gennemsnitligt og maksimum vandindhold i flis fra alle tre stakke (p, u og g). Figuren er baseret på målinger af vandindhold i flis fra samtlige vognlæs, efterhånden som flis er kørt til stakken (før lagring) og kørt væk fra stakken (efter lagring).

Det ses, at selv når der leveres meget homogen og friskhugget flis så varierer fugtigheden betydeligt mellem prøverne. Dette ses på figur 3 som forskel mellem min og max: I dette tilfælde mellem 24 og 51% (min./maks. i stak p og u). I tabel 2 ses standardafvigelsen på målingerne. Standardafvigelsen angiver hvor meget spredning, der er på resultaterne. To tredjedele af målingerne ligger inden for gennemsnittet +/- standardafvigelsen. Det store spænd er ikke forventet, når man ser på flisen i stakken.

Desuden er det iøjefaldende, at variationen bliver markant større efter lagring. Min. falder til 22% og maks stiger til 60%.

I stak p ses denne udvikling ikke. Det indikerer, at presenningen mindsker varmeudviklingen og ventilationen og derved mindsker omfordelingen af vand i stakken. Presenningen betyder dels, at stakken ikke bliver ventileret ved hjælp af vindpres, dels at der bliver iltfrit eller –fattigt, hvorved varmeudviklingen hæmmes.

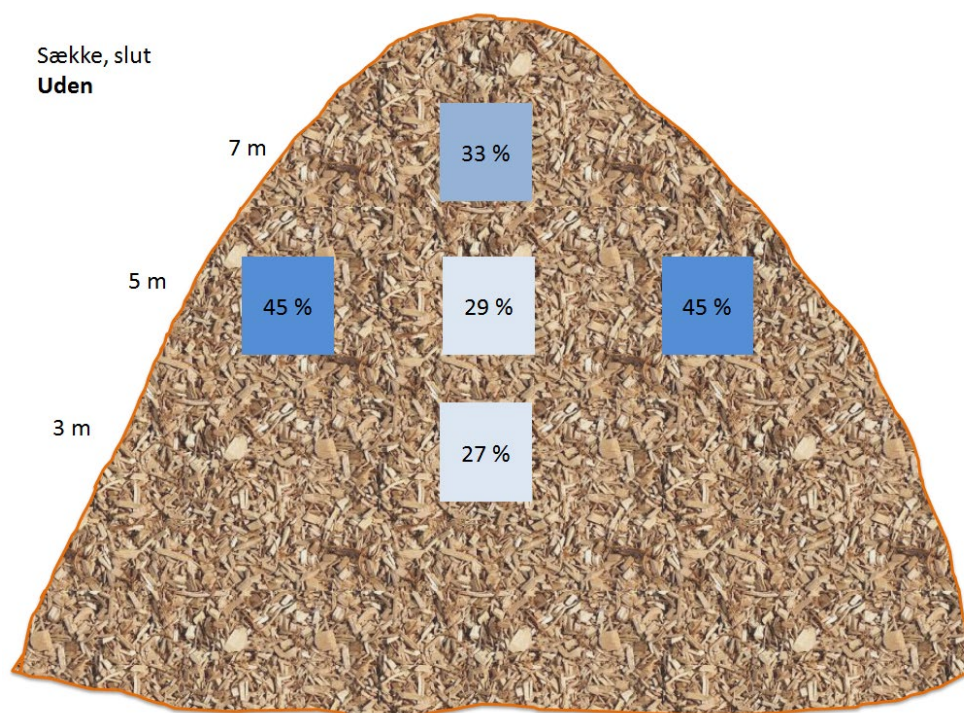
Resultatet viser, at prøvetagningen altid, og især efter lagring, skal udføres yderst grundigt og gerne ved sammenslåning af delprøver fra forskellige steder i læsset. Det fremgår også meget tydeligt, at der skal analyseres et meget stort antal prøver af det varierende materiale for at opnå en pålideligt gennemsnit.



## Sække

Flisen i de sække, der blev placeret i stakkene, har udviklet sig forskelligt afhængigt af placeringen og de processer, der er sket under lagringen.

Vandprocenter:



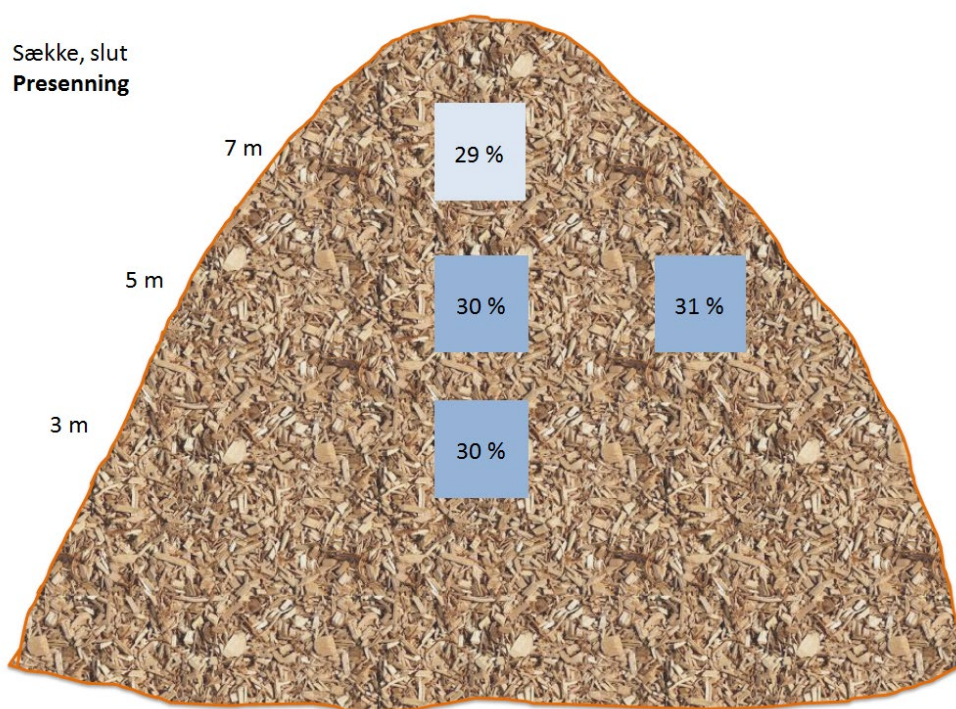
Figur 4: Resultater fra stakken U efter lagring. Hver boks repræsenterer den gennemsnitlige vandprocent af flis fra sække lagret ved den viste placering. Farven på boksen angiver i hvilket interval af 10 procentpoint den gennemsnitlige vandprocent ligger i. Lysere farver svarer til lavere vandprocenter end mørkere farver.

Stakken u med hvid flis uden presenning er forsynet med transekter af 5 sække i fire positioner jf. ovenstående figur (figur 4). De to "ydre" sække regnes som én position og viser begge samme resultat efter lagring, hvilket viser, at stakken udvikler sig på en symmetrisk måde uafhængigt af sidernes orientering mod nord eller syd. Resultatet bekræfter forventningen om, at der dannes en tør midte og en vådere top og yderkant.

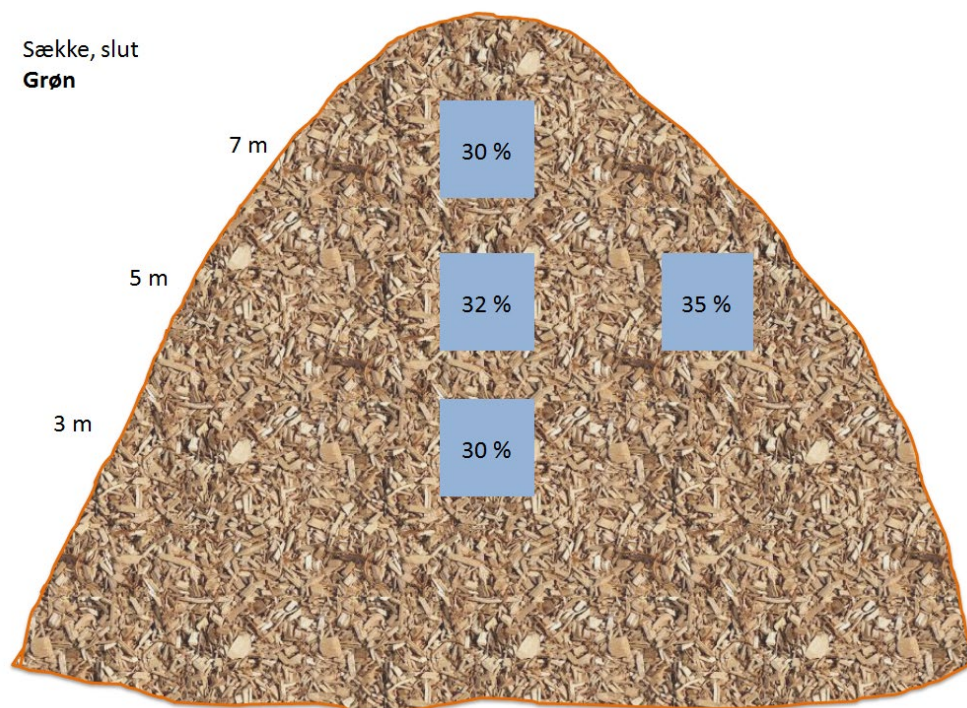
I stakken p, som er hvid flis med presenning, er der kun målt på den ene side i yderpositionen (figur 5). Det skyldes prioritering af projektets midler.

Ud fra erfaringen fra u-stakken kan stakken ses som symmetrisk, og det kan forventes, at den anden yderside har samme vandprocent. I denne stak er vandindholdet stort set homogent. Forskellene skyldes sandsynligvis måleusikkerhed. Den homogene vandfordeling viser, at den sædvanlige omfordeling af vand fra midten og ud til stakkens ydre og top ikke er sket.





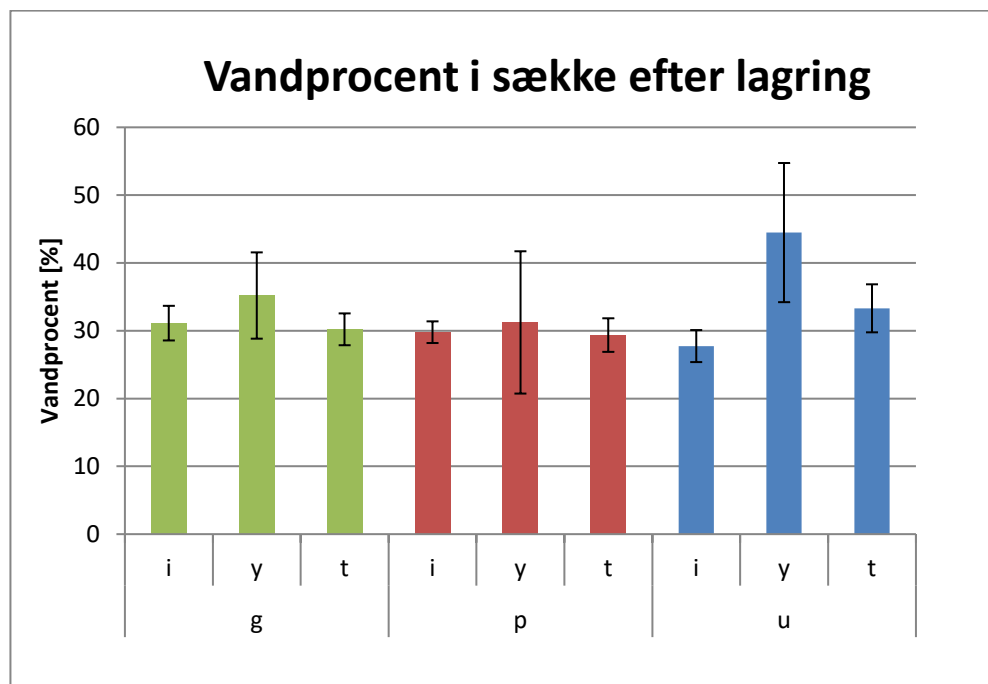
Figur 5: Resultater fra stakken P efter lagring. Hver boks repræsenterer den gennemsnitlige vandprocent af flis fra sække lagret ved den viste placering. Farven på boksen angiver i hvilket interval af 10 procentpoint den gennemsnitlige vandprocent ligger i. Lysere farver svarer til lavere vandprocenter end mørkere farver.



Figur 6: Resultater fra stakken G efter lagring. Hver boks repræsenterer den gennemsnitlige vandprocent af flis fra sække lagret ved den viste placering.

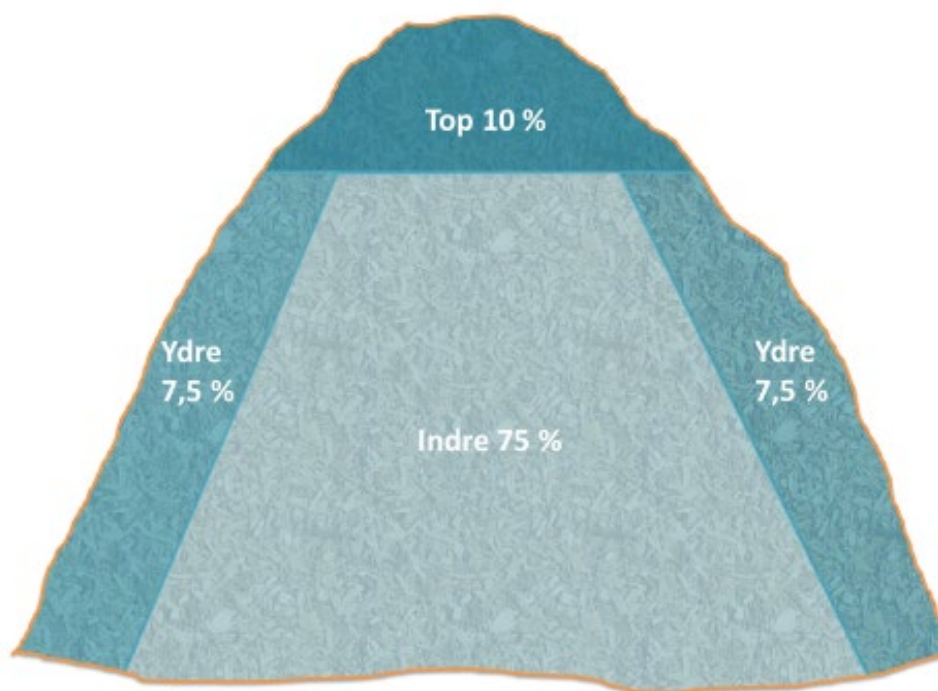
Efter lagring viser sækkene i stak g, at midten er tørret, mens der er mere vand i den ydre del af stakken (figur 6). Sækken, der repræsenterer toppen af stakken, er lige så tør som midten af stakken, hvilket er overraskende.

Ovenstående tre figurer giver et visuelt indtryk af udviklingen i de tre stakke. Nedenstående figur (figur 7) viser en oversigt over vandprocenten efter lagring i de tre stakke (g, p og u) i positionerne i (indre), y (ydre) og t (top).



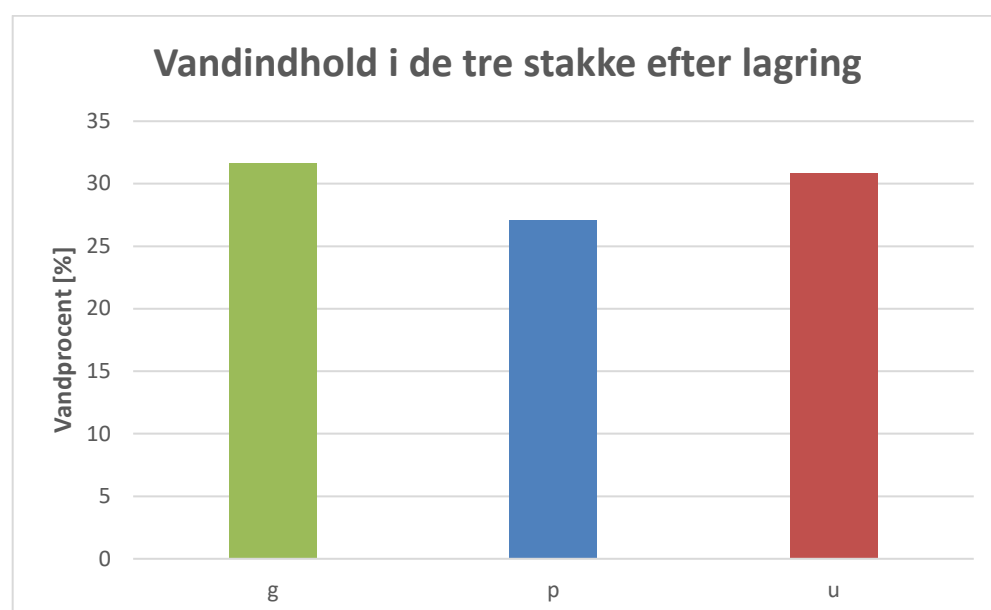
Figur 7: Vandindholdet baseret på sække-målinger for flis i den indre del (i), den ydre del (y) og toppen af stakken (t) efter lagring i hhv. stak grøn (g), presenning (p) og uden presenning (u).

For at beregne stakkenes samlede gennemsnitlige vandprocent ud fra sækkeresultaterne må sækkene fra hver position repræsentere en andel af stakkens volumen. Ud fra forudsætningerne, at den ydre del på hver side er en meter tyk og toppen er en meter i højden, så estimeres andelen af midte til 75%, ydre til 15% og top til 10% (figur 8). De forskellige zoner er naturligvis ikke skarpt adskilte og kan variere betydeligt.



Figur 8: Illustration af stakkens volumenmæssige fordeling i hhv. indre, ydre og top. Hvorvidt fordelingen er helt korrekt afhænger af stakkens geometri. Endelig er det også en faktor, at flis i stakkens indre er mere komprimeret end i stakkens ydre og top. Det viste estimat benyttes i beregningerne i denne rapport.

Ved at gange ovenstående volumen-andele på sækkeresultaterne fås det samlede gennemsnitlige vandindhold for hver af de tre stakke jf. nedenstående figur (figur 9).



Figur 9: Vandindholdet, målt på sække, i de tre stakke under antagelse af at den indre del udgør 75 %, den ydre 15 % og toppen 10 % af det samlede volumen.



Figur 9 viser vandindholdet i de tre stakke efter lagring, målt på sækkene. Den gennemsnitlige vandprocent var højest for den grønne stak (g: 31,6 %), næsthøjest i stakken uden presenning (u: 30,8 %) og lavest i stakken med presenning (p: 27,1 %).

Resultaterne ligger meget tæt og formodentlig så tæt, at forskellene mellem g og u er tilfældige. Resultatet i stak p viser en tendens til lidt bedre tørring under presenning end uden presenning (stak g og u). Det er uvist om presenningen er årsagen til tendensen, eller om den er tilfældig.

Når vi relaterer til vandindhold fra begyndelsen, hvor der var samme vandindhold i stak p og u (36%), så indikerer resultatet, at stak p (med presenning) tørrer lidt mere (fra 36% til 27%), end stak u (fra 36% til 31%). Den grønne flis i stak g (grøn, uden presenning) var vådere fra begyndelsen (42%), men tørrede fra ca. 42% til 32% i løbet af lagringstiden, hvilken er omtrent samme tørring som stak p, med presenning.

Resultaterne tyder på, at der ikke er forskel på den gennemsnitlige vandprocent efter lagring i stak g og u, selvom stakkene opfører sig lidt forskelligt. I stak g er midten lidt vådere end i stak u, mens den ydre zone er vådere i stak u.

Resultatet er svært at tolke i forhold til spørgsmålet om presenningens effekt, da stak p (med presenning) og g (uden presenning) tørrer lige meget. Man kan dog sammenligne stak p og u med samme fliskvalitet og sige, at stak p tørrer 4% mere end u, hvilket tyder på, at flisen tørrer mest under presenning.

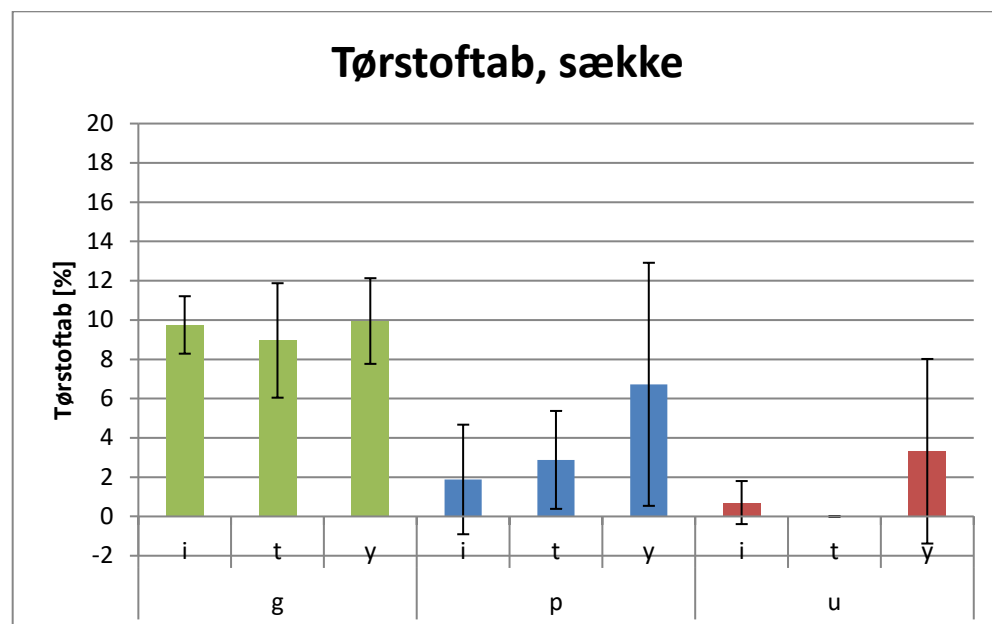


Billede 9: En åbnet flisstak med meget tydelig våd skorpe. (Foto: Simon Skov)

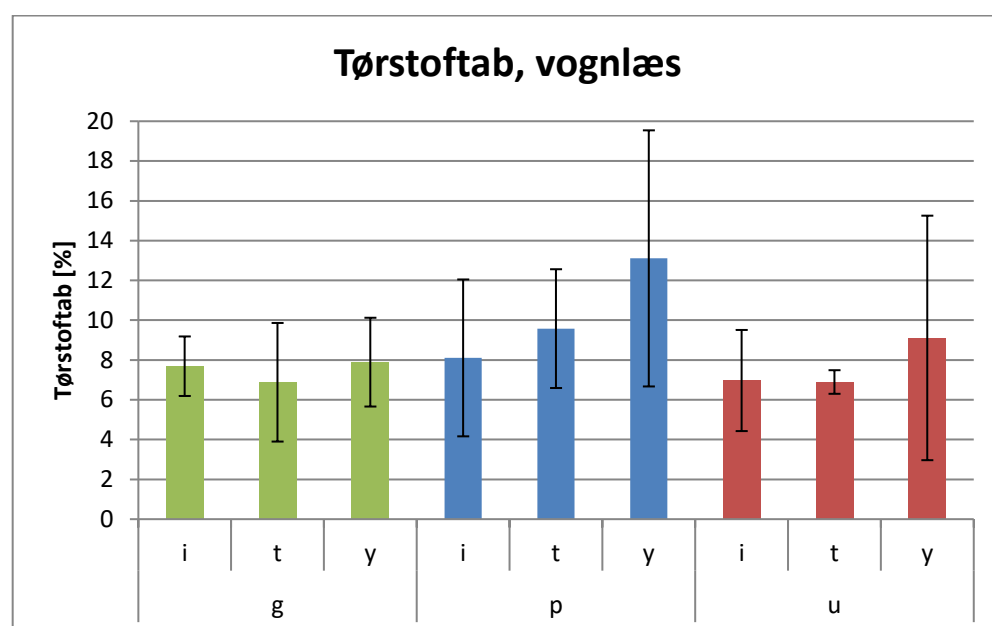
## Tørstoftab

Beregningen af tørstoftab sker ud fra målinger af vægt og vandprocent hhv. før og efter lagring. Ud fra vandindholdet og den samlede friskvægt beregnes tørstofindholdet hhv. før og efter lagring.

Figurerne herunder viser tørstoftabet i procent i forhold til før lagring.



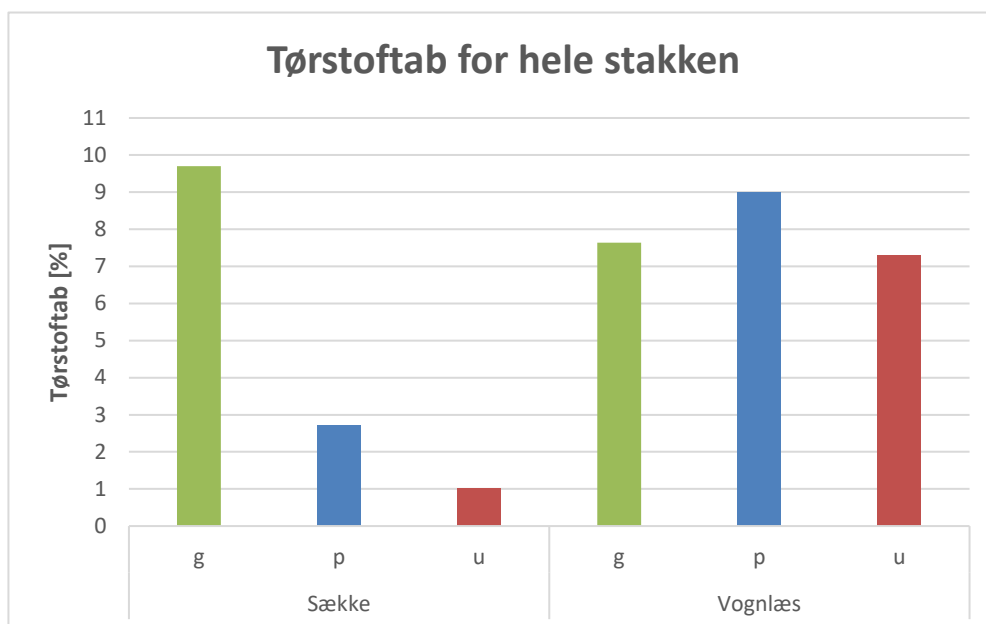
Figur 10: Tørstoftabet i procent for flis i den indre del (i), den ydre del (y) og toppen af stakken (t). Tørstoftabet er her beregnet ud fra målinger af sækkens vandindhold før og efter lagring. Den anvendte start-vandprocent er et gennemsnit af seks prøver udtaget af den homogeniserede mængde af hhv. hvid og grøn flis, som blev fyldt i sækkene.



Figur 11: Tørstoftabet i procent for flis i den indre del (i), den ydre del (y) og toppen af stakken (t). Tørstoftabet er her beregnet ud fra målinger af flisens vandindhold i hvert vognlæs før lagring og målinger af sækkens vandindhold efter lagring. Den anvendte start-vandprocent for hver stak er altså et gennemsnit for hele stakken.



De to ovenstående figurer viser en tendens til, at tørstoftabet er størst yderst i stakkene. Det kan begrundes med, at flisen i stakkens ydre har bedst tilgang til ilt. Det forventede øgede svind som følge af opvarmningen af stakkenes midte ses ikke, måske fordi opvarmningen i de tre stakke var begrænset.



**Figur 12: Gennemsnitligt tørstoftab (%) for hver stak baseret på forskellige start-vandprocenter. "Sække" tager udgangspunkt i start-vandprocenten i de stakke, der blev placeret i stakkene, mens "vognlæs" tager udgangspunkt i den vandbestemmelse, som værket udførte på hvert leveret læs. Lagringstiden er i gennemsnit 7 måneder.**

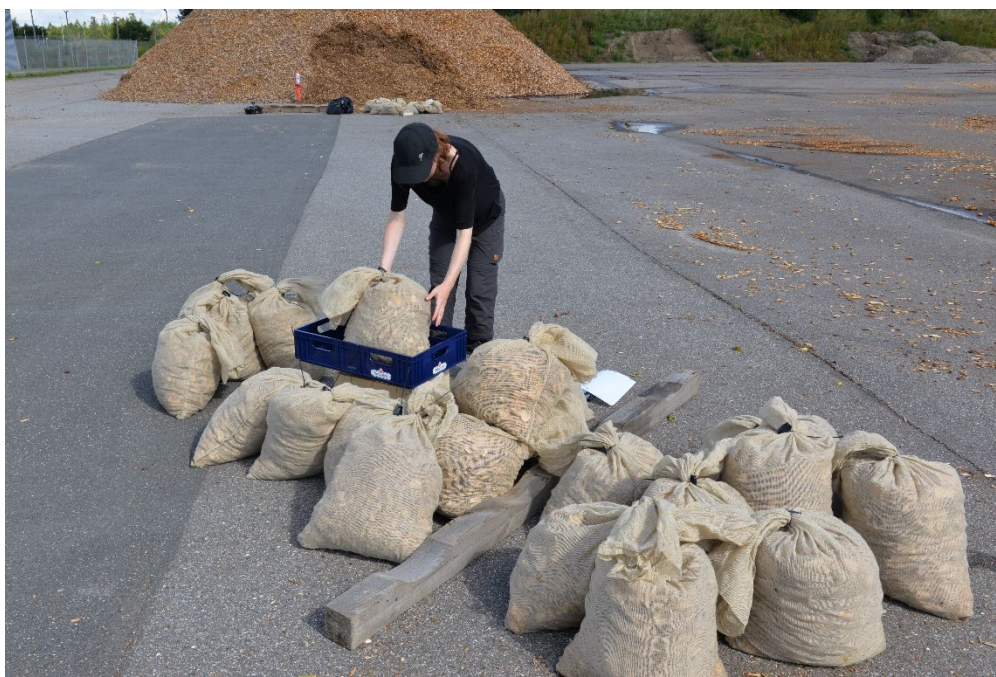
Det fremgår tydeligt, at beregningen af tørstoftabet påvirkes kraftigt af, om der bruges en start-vandprocent fra sækkene eller fra målingen af vognlæs. Ud fra en vurdering af data-styrken, så må "vognlæs" tilskrives størst tillid. Der ligger langt flest målinger i vognlæs-undersøgelsen og de repræsenterer hele stakken i højere grad end de færre målinger i sække-undersøgelsen.

Resultaterne af de to beregninger viser forskellige tendenser.

Sække-beregningen viser, at svindet er markant størst i stak g (9,7%) i forhold til de andre stakke, som ligger på 1-2,7%. Da lagringstiden i gennemsnit er ca. 7 måneder, så er et svind under 3% over hele perioden, dvs. under en halv % pr måned, lavere end de 1-2% svind pr. måned, som anses for normalt.

Vognlæs-beregningen viser et mere ensartet svind mellem stakkene. Svindet er størst i stak p (9%) og mindst i stak u (7,3%). Niveauet svarer til ca. 1% svind pr. måned, hvilket er inden for det forventede spænd mellem 1-2% svind pr måned.

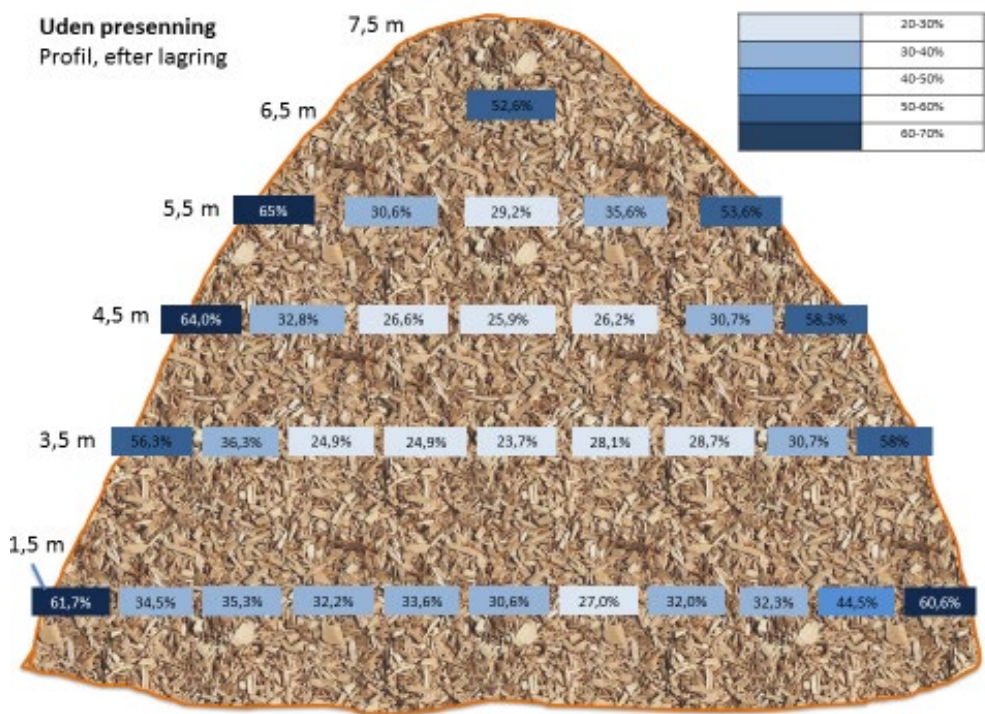
Samtidig må det siges, at der forventes et større tørstoftab i grøn flis end i hvid flis. Denne tendens ses i sække-målingerne, men ikke i vognlæs-målingerne.



Billede 10: Netsække med træflis afvejes til beregning af tørstof-tab. (Foto: Simon Skov)

### Tværsnit

For at opnå et mere detaljeret billede af vandets fordeling i stakkens tværsnit, så er der udtaget 33 prøver fordelt over stak u's tværsnit. Hver prøve er tørret og vandprocenten er beregnet.



Figur 13: Hver boks repræsenterer en flisprøve på omtrent et halvt kilo, hvori vandindholdet er målt. Farven angiver hvilket vandprocent-interval (%) den pågældende prøve ligger i. Profilen er lavet i stakken u (hvid flis uden overdække) efter lagring.

De yderste målinger af skal er taget 0,3 meter inde i stakken og samles i nedenstående tabel i en gruppe kaldet "Ydre". De næst-yderste er taget 1,3 meter inde, og alle målinger indenfor 1 meter fra stakkens overflade er samlet i gruppen "Indre". Den enkelte måling i toppen af stakken kaldes "Top" og er taget omkring 1 meter under overfladen.

**Tabel 3: Resultater af flisprøver fra tværsnit. Det gennemsnitlige vandindhold af flis, inddelt efter placering i stakken. Målingerne er fra stakken u (hvid flis, uden overdække) og er foretaget efter lagring. "Top" er baseret på en enkelt prøve taget 1 meter under stakkens toppunkt. "Ydre" er baseret på 8 prøver taget 0,3 meter fra stakkens overflade i forskellige højde. Begge sider er ligeligt repræsenteret. "Indre" dækker over de resterende prøver, som alle er taget mere end 1 meter fra stakkens overflade. Det antages den indre del udgør 75 %, den ydre 15 % og toppen 10 % af stakkens samlede volumen.**

Placering i stakken	Antal prøver	Gns. vandpct. (%)	Stdafv.
Indre	24	30,9	4,5
Top	1	52,6	-
Ydre	8	59,7	3,9
<b>Total</b>	<b>33</b>	<b>37,4</b>	<b>13,4</b>

Sammenlignes resultaterne med sækkeundersøgelsen, så ser der en mere markant forskel mellem stakkens indre og ydre/top i denne undersøgelse. Forskellen kan forklares med, at sækkene lå længere fra toppen og stakkens ydre, end de yderste/øverste målinger i denne undersøgelse. Resultaterne tyder på, at den våde ydre skal og toppen er begrænset til mellem en halv og en hel meter ind i stakken. Derunder er stakken mere tør og ensartet.

Tørstoftabet er det vigtigste mål for lagersvind. Da værket har røggaskondensering og en vis tolerance overfor fugtigt brændsel, så er ændringerne i vandindhold og nedre brændværdi ikke afgørende. Svindet i tørstof er derimod konkret mistet værdi.

Resultatet af undersøgelsen er afhængig af de vandmålinger, der anvendes til beregningen. Vognlæs-metoden, som er mest troværdig, giver et tørstofsvind på 7-9% på ca. 7 måneder – altså ca. 1% svind pr. måned. Der er kun lidt forskel mellem de tre stakke.

Niveauet er som forventet.

### Brændværdi

Der er udtaget repræsentative flisprøver for indgående flis hhv. hvid flis til stak p og u og grøn flis til stak g. Der er også udtaget flisprøver efter lagring. Disse prøver er taget hhv. i stakkens indre og ydre.

Brændværdien er analyseret som nedre brændværdi på tørt materiale.

**Tabel 4: Flisens nedre brændværdi på tørt materiale (Hnt)(MJ/kg) fordelt på før og efter lagring, de to fliskvaliteter og hhv. i stakkenes indre og ydre.**

<b>Stak</b>	<b>Position</b>	<b>MJ/kg</b>
<b>Hvid flis (p+u)</b>	ind	20,34
<b>Grøn flis (g)</b>	ind	20,13
<b>Stak u</b>	indre	20,13
	ydre	20,16
<b>Stak p</b>	indre	20,05
	ydre	20,37
<b>Stak g</b>	indre	20,15
	ydre	20,40

Resultatet viser, at både det leverede grønne og hvide flis indeholder mere energi, end de normalt anvendte 19,2 GJ/t. Resultatet viser også, at der ikke er forskel på energiindholdet pr. vægtenhed før og efter lagring. Endelig viser resultaterne, at der ikke er forskel brændværdien af tørstoffet i stakkens indre og ydre.

Alle resultater er forventelige. Det er især vigtigt at være bevidst om, at svind ikke drejer sig om ændringer i brændværdien (energi/vægt), men om tab af tørstof.

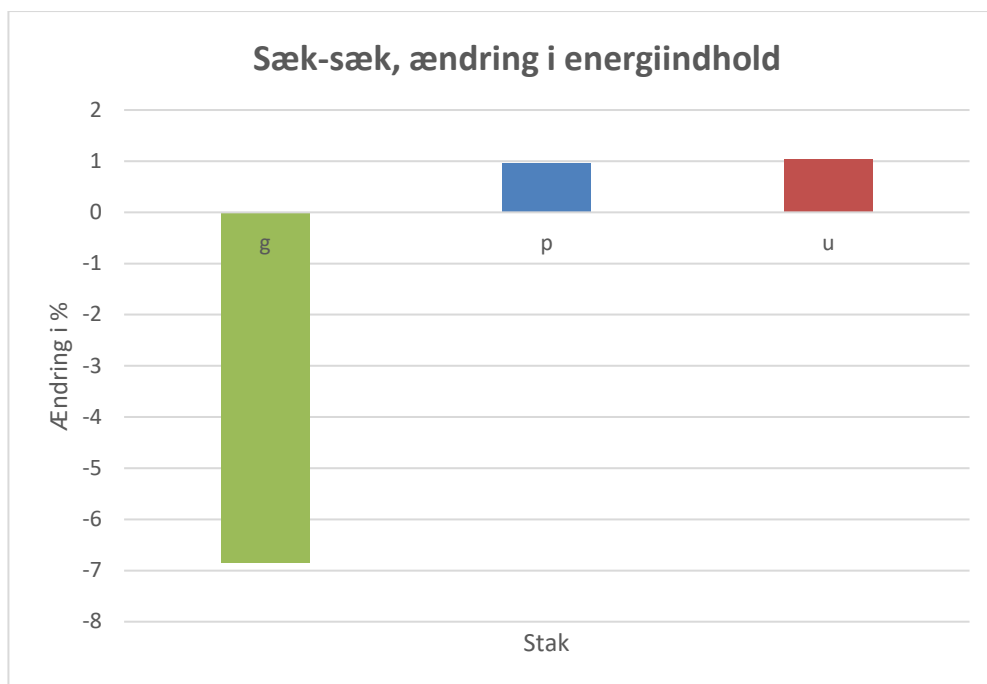
## Energitab

Energitabet, som vises i figurerne herunder, er beregnet på baggrund af flisens nedre brændværdi (afhænger af vandprocenten) og mængden af flis. Enheden er GJ.

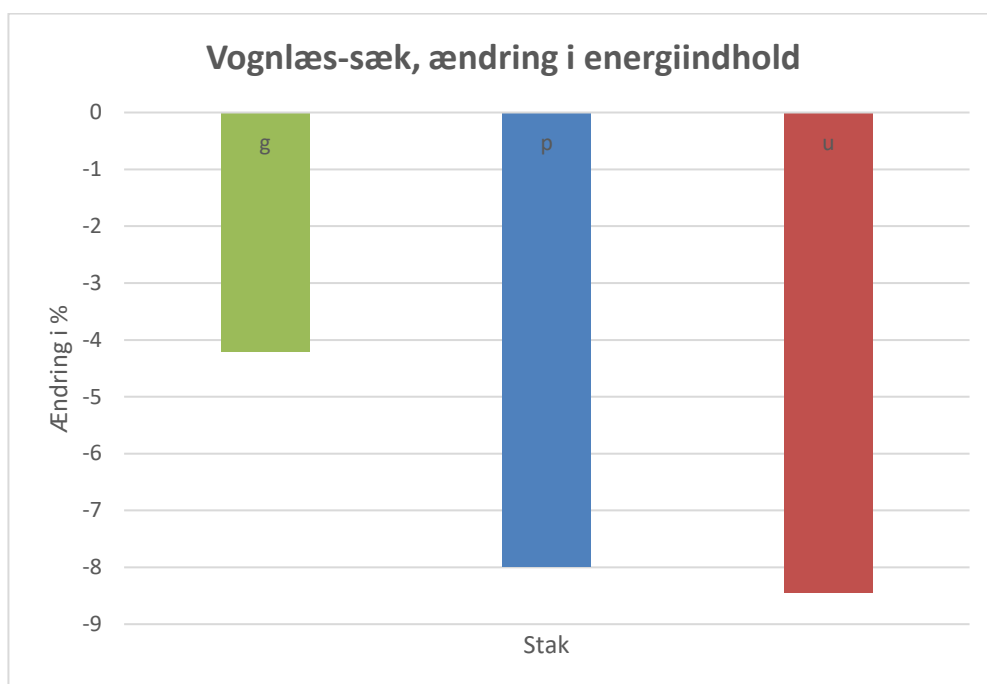
Energiudviklingen kan også udtrykkes som nedre brændværdi i den tilbageværende flis uden hensyntagen til mængden af flis. I så fald skal enheden være GJ/ton flis.

Det er vigtigt at være bevidst om hvilken type energitab, der er tale om. Herunder er det stakkens samlede energiindhold, som vises.

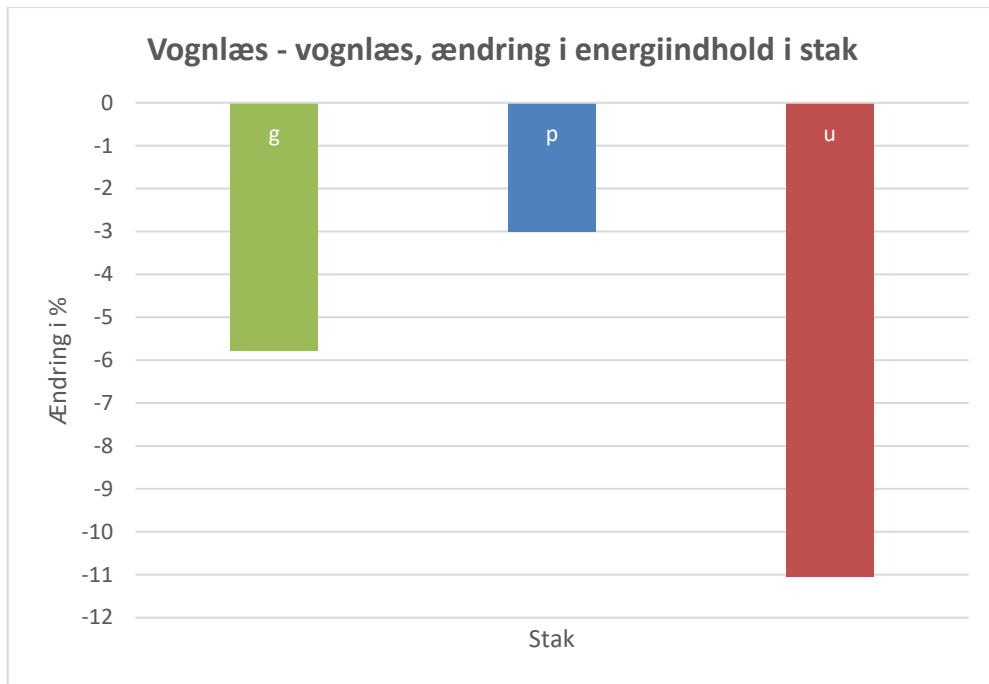




Figur 14: Procentvis ændring i energiindhold (Gj) i sække, beregnet på vandprocenter målt i sækkene før og efter lagring.



Figur 15: Procentvis ændring i energiindhold (Gj) i sække, beregnet på vandprocenten før lagring målt i vognlæs og vandprocenten efter lagring målt i de enkelte sække.



Figur 16: Procentvis ændring i energiindhold (GJ) i stakkene, beregnet ud fra vandprocenter målt i vognlæs før og efter lagring.

Ændringerne i stakkene afhænger af, hvilke start- og slutvægte der anvendes, samt hvilke vandprocenter der anvendes.

Mens sæk-sæk-målingerne viser øget energi i stak p og u, og svind i stak g, så viser vognlæs-sæk-målingerne mest svind i stak p og u. Vognlæs-vognlæs-målingerne viser mindst svind i stak p og mest i stak u.

Resultaterne er vanskelige at tolke ud over, at alle tal ligger i et realistisk spænd fra ca. 0 til 11% efter 7 måneders lagring. På grund af vognlæsundersøgelsens høje antal vægt- og vandmålinger, så må disse tal tillægges størst vægt.

Resultaterne i vognlæs-vognlæs-figuren (figur 16) svarer til forventningen i forhold til mere svind i stak u end i stak p. Det er dog ikke forventet, at der er større svind i stak u end i stak g, idet de grønne dele i stak g vil være lettere nedbrydelige under lagring.

### Konklusion – vandindhold og svind

Det har vist sig meget vanskeligt, at estimere stakkenes samlede gennemsnitlige vandindhold, idet variationen er meget stor, hvilket blandt andet skyldes opfordelingen af vand under lagring.

Vandindholdet er afgørende for flisens nedre brændværdi (J/kg). Lægges der vægt på flisens vandindhold, så er figur 16 den vigtigste. Den viser, at stak p svinder 3% i nedre brændværdi, mens stak u svinder 11%. Om de 8%-point difference i nedre brændværdi, som skyldes forskel i vandindholdet, er argument for at afdække med presenning, afhænger af værket drift. Herunder om værket har

kondenseringskapacitet til at udnytte en større mængde damp.  
Underdimensionerede anlæg vil typisk efterspørge tør flis.

Vandets fordeling i stakken er forskellig med og uden presenning. Stakken med presenning havde en mere homogen fordeling af vand end stakken uden presenning. Når stakken danner den traditionelle våde skorpe og en våd top, så vil den indfyrede flis variere mere i vandindhold, end hvis stakken ikke har opfordelt vandet.

Uanset anlægstypen, så er tørstof-tab en vigtig parameter, idet energien ligger i tørstoffet. Figur 12 viser tørstoffetabet efter en gennemsnitlig lagringstid på 7 måneder. Det vurderes, at der skal lægges størst vægt på vognlæg-vognlæs metoden. Den viser, at der har været et svind i tørstof på 9,0% i stak p og 7,3% i stak u. Under hensyntagen til undersøgelsens usikkerhed, så skal forskellen formodentlig ikke tillægges stor vægt, men betragtes som svind i samme størrelsesorden.

Undersøgelsens primære spørgsmål er, om det kan betale sig at overdække stakke med presenning. Svaret er nej! Når svindet er i samme størrelsesorden, så kan det ikke betale sig at oplægge og vedligeholde en presenning.



Billede 11: Stak p til venstre og stak u til højre. (Foto: Simon Skov)

## Perkolat

Perkolat betyder vand, der siver gennem stakken. Det forventes på forhånd at perkolat i en flisstak enten slet ikke findes, fordi vandet bindes i stakkes ydre skal eller fordamper på grund af stakkens varme.

De tre stakke i denne undersøgelse udviklede kun en begrænset varme. Dette faktum skal tænkes ind i undersøgelsens konklusion.

## Perkolatdannelse

Det er velkendt, at varmeudviklingen i flisen danner "skorstene", der leder fugtig, varm luft frem til et punkt på stakkens overflade, ofte et stykke under stakkens top. Fra dette punkt kan der ses damp når vejret tillader det. Flisen er våd og varm.

Under vejs i projektperioden, hvor flisstakke blev brugt, opstod lodrette tværgående profiler gennem stakken. Ved nærmere eftersyn viste det sig, at der var fugtige kanaler i flisen. Men disse kanaler var kolde og løb helt til jorden. Det formodes, at disse kanaler er "nedløbsrør", der leder vandet fra overfladen af stakken og ned til jorden. Nedløbsrørene er således en del af perkolatdannelsen.

De velkendte skorstene er varme og udspringer fra varme områder i stakkens midte. De nye "nedløbsrør" er kolde og bugter sig fra stakkens overflade og helt til jorden. I begge tilfælde er flisen meget vandholdig og har et bugtende forløb, der snor sig i forhold til gennemtrængeligheden i den komprimerede flis.



Billede 12: Vand fra overfladen af flisstakken ledes igennem snoede kanaler, "nedløbsrør", til jorden. Markeret med rød.



## Forsøgsdesign

For at påvise, om der er perkolatdannelse under flisstakke og, i bekræftende fald, hvad perkolatet indeholder, er der fremstillet rækker af spande til opsamling af perkolat i faste intervaller.

Transekterne blev gravet vandret ind i flisstakkene så spandenes dybde i stakken kunne måles fra stakkens nederste kant og ind mod midten af stakken. Afstanden fra kanten var: 0,5m, 1m, 2m, 4m, 6m, og 9m. Intervallerne afspejler forventningen om, at det var mest sandsynligt, at perkolatdannelsen ville ske i stakkens yderste lag.

Spandene blev forsynet med et stærkt net over åbningen, så spandene ikke blev fyldt med flis, som evt. ville ligge i vandet og påvirke vandets indhold. Til udtagning af vandprøver, blev der monteret en teflonslange med munding ved spandens bund. Slangen blev ført ud gennem et hul under spandens kant, så slangen ikke blev klempt sammen over spandens rand. Slangerne blev ført langt transektet og ud til stakkens overflade.

Det opsamlede vand i spandene blev suget ud i en prøveflaske ved hjælp af en manuel pumpe, der kan skabe vakuum i en luftfyldt slange.

Antallet af transekter blev prioriteret, så der blev indlagt tre i stak u og én i stak g og p.

Alle transekter blev etableret ultimo august 2016.

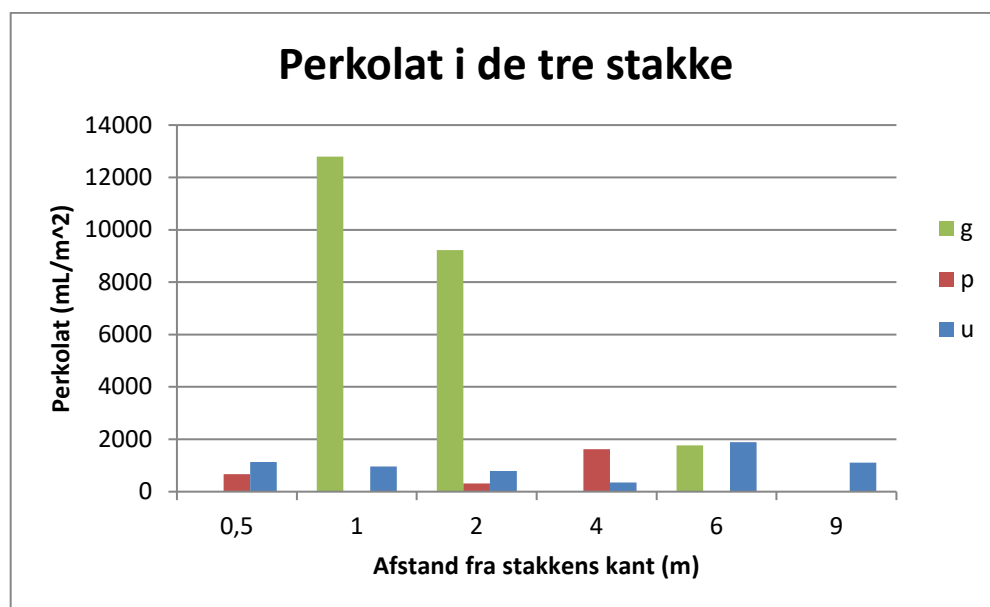


Billede 13: En række med 6 spande inden den graves ind i en flisstak. Her ses også de teflonslanger, som er monteret med henblik på udtagning af vandprøver fra spandene. (Foto: Simon Skov)

## Perkolat i de tre stakke

Det var forventet, at stak p, der er dækket af presenning, ville mangle perkolat, mens stak g og u begge ville danne perkolat i de yderste spande. Vi anså det for urealistisk, at der var perkolatdannelse i midten af stakkene.

Nedenstående figur viser, at forventningerne ikke stemmer overens med resultaterne.



Figur 17: Sammenligning af de tre stakkes gennemsnitlige perkolatmængde pr. kvadratmeter indsamlet ved forskellige afstande fra stakkens kant.

Det viser sig, at der mod forventning findes perkolat i både stak g, p og u. Det er især overraskende, at der dannes perkolat i stak p med presenning. Enten kommer vandet ind gennem "udluftningshullerne", ellers stammer vandet fra kondens.

Det viser sig også, at der kan opsamles perkolat hele vejen ind til stakkens midte. Der er ikke markant mere perkolat under stakkens yderste våde skorpe (0,5 m) end der er længere inde. Der er ikke fundet perkolat mere end 4 meter inde i stak p, hvilket måske kan understøtte teorien om kondensatdannelse, da kondensatet vil dannes i stakkens kolde yderste dele. Det er samtidigt uforklarligt, hvorfor der er fundet mere perkolat 4 meter inde i stakken end i den yderste og koldeste del.

Det er overraskende, at stak g opfører sig markant anderledes end stak u, idet de ikke har presenning. Der er målt langt mere perkolat i stak g end i p og u. Afvigelsen virker uforklarlig set i sammenhæng med flisqualiteten. Den eneste forskel, der måske kan forklare forskellen er stakkens fysiske struktur. Der er iagttaget en lavning i flisstakkens overflade hen over transektet med opsamling af perkolat. Lavningen er opstået mellem to toppe under den almindelige etablering/opskubning af flis i stakken. Da der kun er etableret én transekt i stak g, så kan det hverken af- eller bekræftes, om fordelingen af perkolat generelt er som resultatet viser, eller resultatet kun gælder for den specifikke transekt.

Det viser sig for alle stakke, at der findes perkolat dybere inde i stakken end den yderste våde skorpe. Der er kun udtaget perkolat fra stakkens midte (9 meter) fra stak u. Om det er et validt resultat eller en tilfældighed er uvist.

## Perkolatmængde

Der blev samlet perkolat tre gange fra hver position på de 5 transekter. Der var ikke perkolat i alle spande. Nedenstående tabel viser hvor mange milliliter perkolat, der er samlet. Der er kun vist data for spande, hvor der blev fundet perkolat. Alle andre spande var tørre.

**Tabel 5: Perkolatmængden (milliliter) indsamlet ved forskellige afstande fra stakkens kant på tre indsamlingsdatoer. Resultaterne er fra stak g, p og u. For stak u vises gennemsnittet af de tre transekter.**

Stak	Meter	07.11.16	12.12.16	18.01.17
g	1	-	1161	-
	2	837	-	-
	6	161	-	-
p	0,5	-	-	181
	2	84	-	-
	4	231	162	47
u	0,5	261	25	22
	1	206	55	-
	2	136	78	-
	4	94	-	-
	6	514	-	-
	9	303	-	-

Stak g: indsamlingen af perkolat er præget af to store indsamlinger fra 2-meter spanden d. 7/11 og 1-meter spanden d. 12/12.

Stak p: Her er ikke fundet perkolat dybere end 4 meter inde i stakken og mængderne er relativt små.

Stak u: Her blev indsamlet perkolat fra alle positioner fra yderst til inderst ved den første indsamling d. 7/11. Ved den næste prøvetagning fandtes kun perkolat ind til 2 meters dybde fra kanten og sidste prøvetagning viste kun perkolat i yderste spand.

Det er uvist om resultaterne kan tolkes som et tidsforløb med tendens til mindre perkolat midt i stakken sidst på lagringsperioden eller om forskellen på datoerne er tilfældige. Hvis der var sket en temperaturudvikling i stakkens midte, ville det påvirke perkolatets bevægelse i stakken, men det er ikke tilfældet.

Det skal naturligvis med i tolkningen at der er ca. 2 måneder fra etableringen af transekterne til første opsamling, mens der er ca. én måned mellem 2. og 3. opsamling. Opsamlingsperioden er dog ikke en dækkende forklaring, idet der er

indsamlet mere end dobbelt så meget perkolat ved 1. indsamling end ved 2. og 3. indsamling.

Der er ikke indsamlet nedbørsdata pga. projektets begrænsede omfang.

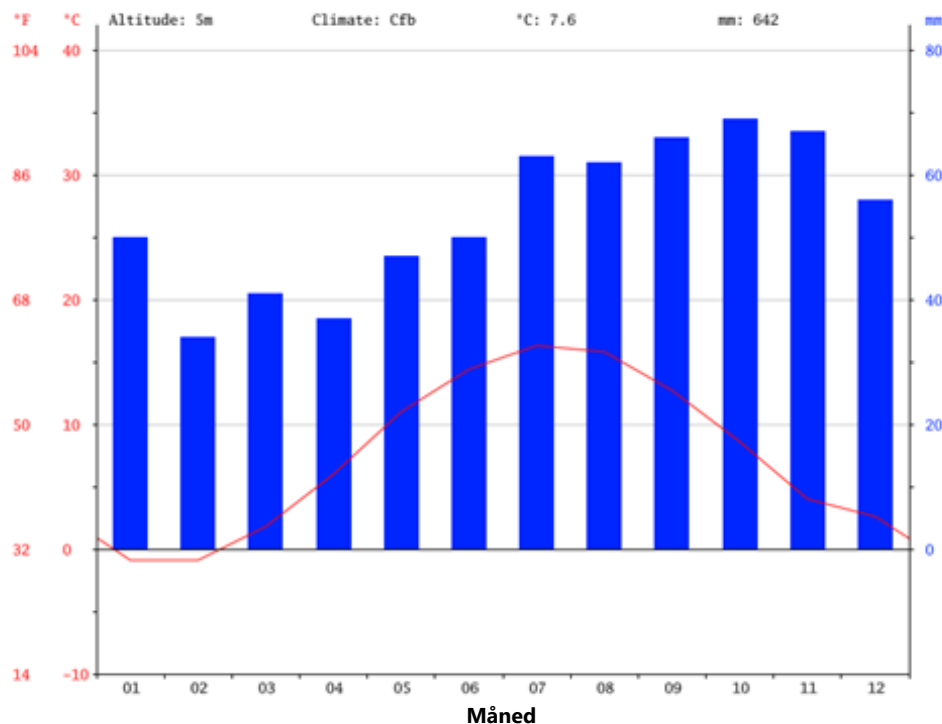
Den overordnede mængde af perkolat kan estimeres ved at beregne den gennemsnitlige opsamling over de 4 måneder fra etablering til sidste opsamling. På trods af undersøgelsens begrænsede størrelse, er der påvist betydelig variation mellem stakkene og mellem indsamlingsdatoerne. Denne beregning er et estimat for den samlede perkolatdannelse uden hensyntagen til de påviste variationer. Der er foretaget tre indsamlinger fra 5 transekter med 6 spande. Hver spand opsamler perkolat fra et areal på  $0,09 \text{ m}^2$ . Der er i alt opsamlet perkolat i 4 mdr.

Der er i alt indsamlet 4558 ml perkolat ved 90 prøvetagninger. Heraf var der perkolat i 21 prøver og ingen ting i 69 prøver. Den gennemsnitlige indsamling var på ( $4558 \text{ ml}/90 \text{ prøver}$ ) 51 ml. Med  $0,09 \text{ m}^2$  pr prøve, og 4 måneders prøvetid, giver det en gennemsnitlig perkolatdannelse pr. måned på 140 ml perkolat pr.  $\text{m}^2$  pr måned.

De 140 ml pr.  $\text{m}^2$  i gennemsnit pr måned skal sammenlignes med nedbøren. Perkolationen svarer til 0,14 mm pr. måned. Ud fra nedenstående klimafigur fra Hadsund så regner det i runde tal 65 mm om måneden sidst på året i Hadsund (figur 18). Det betyder, at perkolatet under en stak svarer til ca. 0,2 % af nedbørsmængden oven på stakken.

Anderledes forholder det sig med den nedbør, der rammer asfalten på resten af pladsen. Der vil formodentlig ske en mindre fordampning, men hovedparten vil løbe til afløbet. Blandingen af overfladevand og perkolat vil afhænge af den andel af pladsen, der er dækket af flis.





Figur 18: <https://da.climate-data.org/europa/danmark/north-denmark-region/hadsund-860621/>

Resultaterne viser, at der dannes perkolat under flisstakke. Der findes perkolat både under den yderste, våde skal og længere inde i stakken. Selv i stakkenes midte findes perkolat. Perkolat bevæger sig i gennem flisen ad bugtede "nedløbsrør" og perkolatdannelsen er meget varierende.

Mængden og dybden i stakken varierer, og kan ikke beskrives i detaljer i dette lille projekt, men inddrages alle data i projektet, uanset staktypen, kan der estimeres en gennemsnitlig månedlig perkolatdannelse på 140 ml pr. m<sup>2</sup>, hvilket er ca. 0,2% af nedbørsmængden.

Hvis flisstakken ligger på permeabelt underlag, som fx i skoven, vil perkolatet sive ned i jorden, hvor det blandes med normalt jordvand. Hvis stakken ligger på fast underlag, som fx asfalt i Hadsund, så vil der ske en opblanding mellem overfladevand og perkolat. I så fald er det arealet af flisstakkene i forhold til pladsens størrelse, der definerer opblandingen.

Der indgår ikke målinger af spildevandet fra pladsen i nærværende projekt. Formålet med denne perkolatundersøgelse er at afklare, om der dannes perkolat.



Billede 14: Ved udgravning af en flisstack ses at nederste lag flis er meget vandholdigt. (Foto: Simon Skov)

### Perkolatvandkemi

Det er perkolatets indholdsstoffer og en eventuel opblanding med overfladevand, der er afgørende for hvordan stakken påvirker vandmiljøet.

Analyserne er præsenteret i nedenstående tabel (tabel 6). Det bør bemærkes, at gennemsnittene er baseret på forskellige prøvestørrelser, hvor flisbunken uden presenning (u) bidrager med flest prøver. Dette skyldes dels forsøgsdesignet, hvor g er repræsenteret med færre spande, og dels at den fundne mængde perkolat var fordelt på flere spande i u, relativt til g og p. Prøver indsamlet den 14.03.17 er undladt i de samlede analyser af perkolatvandkemien, da der er tvivl om nøjagtigheden af de kemiske analyser.

I det nedenstående holdes analyseresultaterne fra perkolatprøverne op mod grænseværdier i tre relevante regelsæt. De er hhv. "Tilslutning af industrispildevand til offentligt spildevandsanlæg" vejledning nr. 2 fra Miljøstyrelsen (VEJ 2), værdier fra Grundvandskvalitetskriteriet fra Miljøstyrelsen (GVK), og "Bekendtgørelse om fastlæggelse af miljømål for vandløb, overgangsvande, kystvande og grundvand" fra Miljøstyrelsens Bekendtgørelse nr. 1070 (BEK1070).

Grænseværdierne skal derfor tolkes ud fra den ønskede afledningsform.

VEJ2: Afledning til kloak.

GVK: Nedsivning til grundvandet.

BEK 1070: Udledning til overfladevand som sø eller å.

Tabel 6: Resultater af kemiske analyser af perkolatvand fra spandene. Den gennemsnitlige koncentration er et gennemsnit af alle perkolatprøver i den pågældende stak. Røde tal angiver at mindst én grænseværdierne er overskredet. Grænseværdierne er udvalgte værdier fra Vejledning fra Miljøstyrelsen nr. 2 "Tilslutning af industrispildevand til offentligt spildevandsanlæg" (VEJ 2), samt værdier fra Grundvandskvalitetskriteriet (GVK) fra Miljøstyrelsen, fra Bekendtgørelse nr. 1070 fra Miljøministeriet "Bekendtgørelse om fastlæggelse af miljømål for vandløb, overgangsvande, kystvande og grundvand" (BEK1070).

Stof	Enhed	g		p		u		Grænseværdier		
		Gns. konc.	Stdafv.	Gns. konc.	Stdafv.	Gns. konc.	Stdafv.	1: VEJ 2	2: GVK	3: BEK 1070 <sup>a)</sup>
DOC	mg/L	65,52	0,14	39,60	16,35	102,44	88,50			
Al	mg/L	0,11	0,03	0,04	0,03	0,34	0,89			
Ca	mg/L	8,93	2,31	3,90	2,58	14,47	12,15			
Fe	mg/L	0,16	0,01	6,00	9,69	0,62	1,89			
K	mg/L	122,96	43,74	11,02	7,36	275,77	837,76			
Mg	mg/L	5,33	1,71	1,66	1,22	27,69	86,22			
Mn	mg/L	1,09	0,72	0,26	0,15	1,42	1,83			
Na	mg/L	16,71	0,83	2,59	0,54	49,95	156,58			
P	mg/L	34,11 <sup>3</sup>	1,34	5,40 <sup>3</sup>	4,85	137,02 <sup>3</sup>	459,34			1,5
S	mg/L	4,58	3,85	2,12	0,58	8,58	17,58			
B	µg/L	109,83	43,30	20,49	16,61	399,80	1339,88			
Cd	µg/L	0,34	0,07	0,20	0,19	0,56 <sup>2+3</sup>	0,40	3	0,5	0,45-1,5 <sup>b)</sup>
Co	µg/L	0,35	0,13	0,08	0,06	0,33	0,30			
Cr	µg/L	0,57	0,23	0,53	0,43	0,52	0,29	300	25	124
Cu	µg/L	8,91 <sup>3</sup>	2,98	6,18 <sup>3</sup>	5,42	13,88 <sup>3</sup>	7,18	100	100	2
Ni	µg/L	4,46	1,12	1,52	1,02	5,35	4,20	250	10	34
Pb	µg/L	1,92 <sup>2</sup>	0,08	0,57	0,43	1,36 <sup>2</sup>	0,89	100	1	2,8
Zn	µg/L	143,84 <sup>2+3</sup>	29,15	74,27 <sup>3</sup>	59,53	206,89 <sup>2+3</sup>	127,24	3000	100	8,4

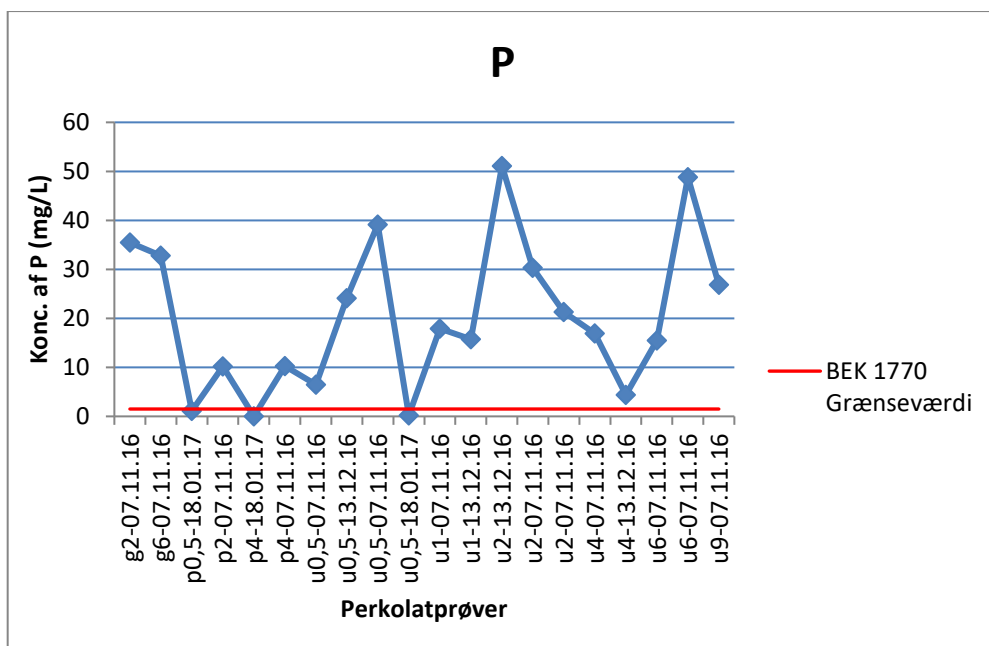
a Korttidskrav ved udledning til ferskvand. For alle metaller gælder værdierne for metallet på opløst form.

b Afhænger af vandets hårdhedsgrad. Skrappeste krav ved udledning til blødt vand.

Tal angiver hvilke grænseværdier, der er overskredet. 1= VEJ 2, 2= GVK, 3= BEK 1070

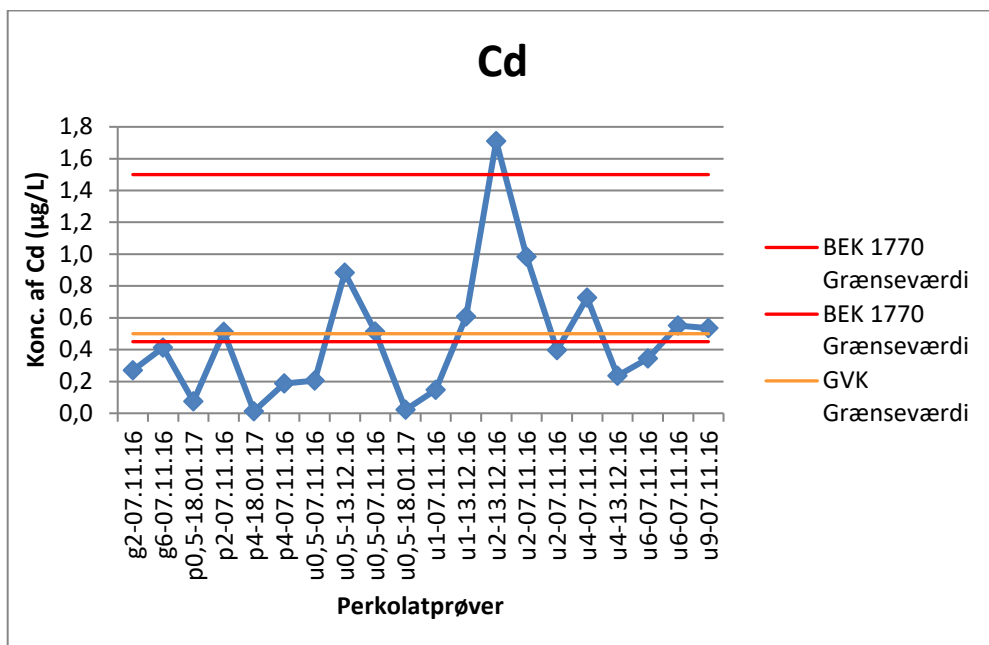
Som det ses på de røde tal i tabellen, så overskrider kravene i VEJ2 ikke, mens GVK og BEK1070 overskrider flere gange.

Det viser sig, at koncentrationerne af de enkelte grundstoffer optræder i samme mønster på tværs af de forskellige perkolatprøver. Det vil sige, at en prøve med en forholdsvis høj koncentration af et stof også har en forholdsvis høj koncentration af andre stoffer. Koncentrationen af perkolatvandet varierer mellem prøvetagningsstederne og svinger over tid. Enkelte grundstoffer undviger dog fra dette mønster, heriblandt Mn, Fe, Cu og S. Nedenstående figurer viser koncentrationsmønstrene for de analyserende grundstoffer, og angiver hvilke prøver, der overskrider af én eller flere grænseværdier for udledning.



Figur 19: Perkolatprøvernes varierende koncentrationer af fosfor (P) sammenlignet med grænseværdien i BEK 1770. Prøverne er navngivet med stak (g, p og u), og meterposition (afstanden fra kanten til spanden) og med datoen.

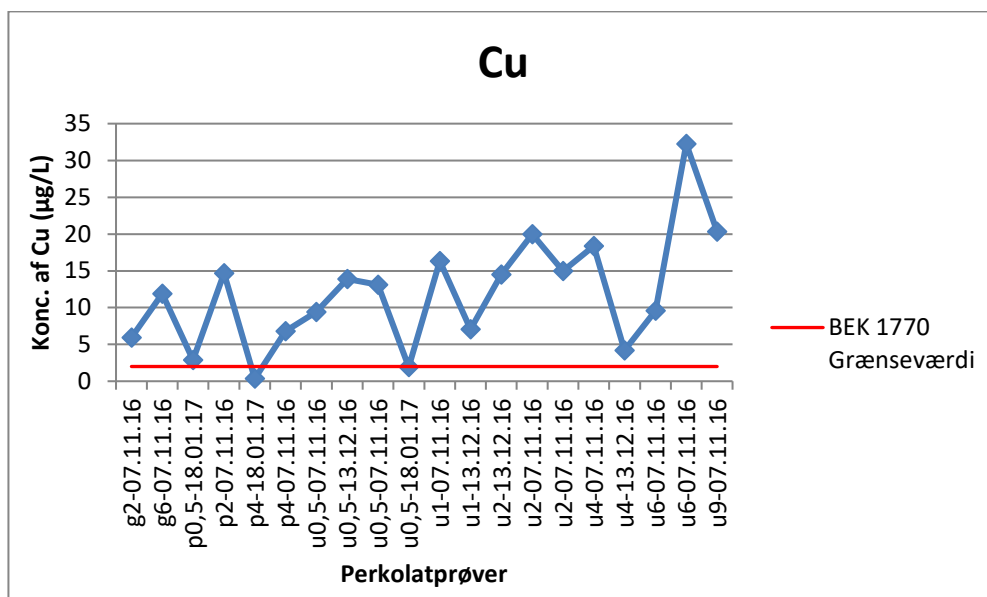
For fosfor (P) gælder der således, at næsten alle perkolatprøver i sin rene ufortyndede form overskrider kravene om udledning til overfladevand. Overskridelserne er op til 100 gange grænseværdien. Det er dog realistisk, at der vil ske en 100 gange fortynding inden afløb til overfladevand.



Figur 20: Perkolatprøvernes varierende koncentrationer af cadmium (Cd) sammenlignet med grænseværdien i GVK grænseværdisintervallet i BEK 1770. Kravet angives som et interval mellem to niveauer og afhænger af vandets hårdhed i recipienten. Prøverne er navngivet med stak (g, p og u), og meterposition (afstanden fra kanten til spanden) og med datoen.

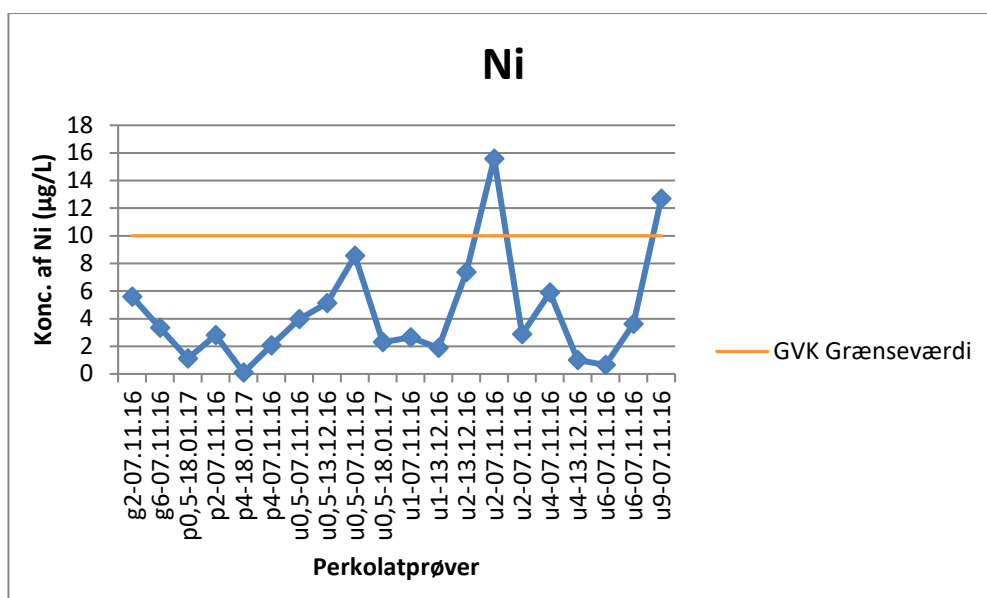


Cirka halvdelen af perkolatprøverne i sin rene ufortyndede form indeholder mere cadmium (Cd), end tilladt i forhold til GVK. Én prøve ligger over øverste grænse i BEK 1770, mens de andre ligger i intervallet hvor vandets hårdhed afgør den aktuelle grænseværdi.



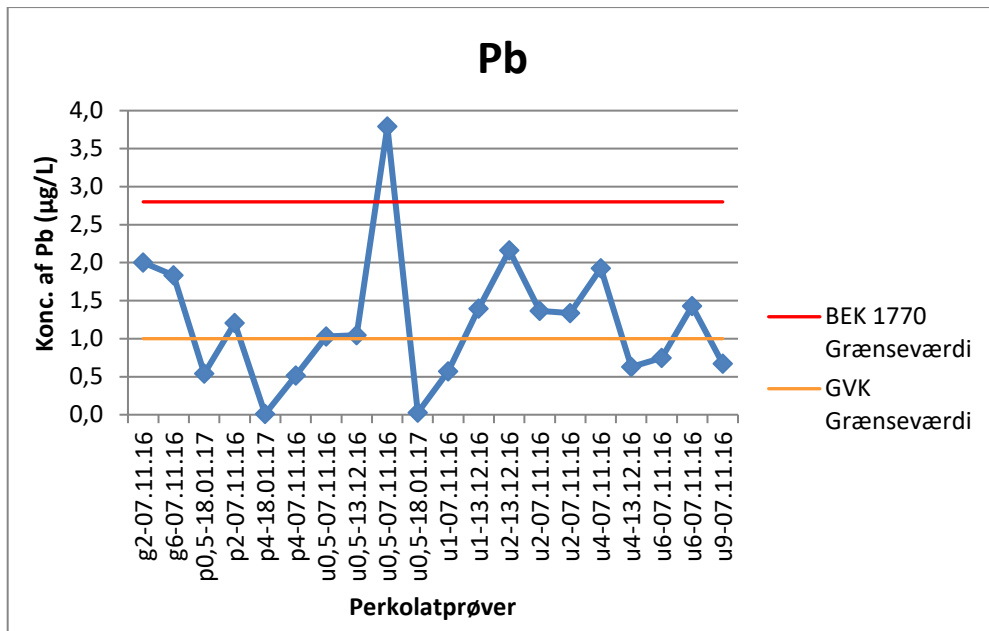
Figur 21: Perkolatprøvnernes varierende koncentrationer af kobber (Cu) sammenlignet med overtrådte grænseværdier.

Alle prøver, på nær én, overskrider kravene for udledning af kobber (Cu) til overfladevand (BEK1770).



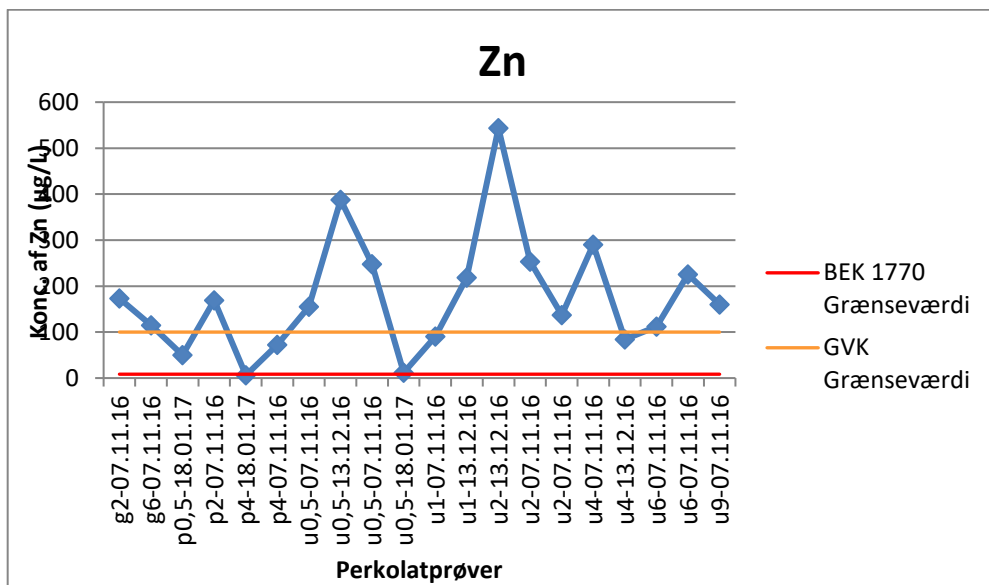
Figur 22: Perkolatprøvnernes varierende koncentrationer af nikkel (Ni) sammenlignet med overtrådte grænseværdier.

To prøver overskrider grænseværdien for nikkel (Ni) i GVK.



Figur 23: Perkolatprøvernes varierende koncentrationer af bly (Pb) sammenlignet med overtrådte grænseværdier.

Under halvdelen af prøverne ligger under GVK-grænseværdien for bly (Pb), mens én ligger over BEK 1770.



Figur 24: Perkolatprøvernes varierende koncentrationer af zink (Zn) sammenlignet med overtrådte grænseværdier.

Alle prøver overskrider grænseværdien for zink (Zn) i BEK 1770 og over halvdelen overskrider også grænseværdien i GVK.

Det samlede billede er, at ufortyndet perkolat overholder grænseværdierne for tilslutning af industrispildevand til offentligt spildevandsanlæg (VEJ 2), men overskrider GVK og BEK 1770 på flere parametre. Dette projekt giver ikke resultater for opblandet overfladevand fra pladsen.

Opblandingen af perkolat og overfladevand fra pladsen sker formodentlig ved at overfladevand skyller ind under stakken. Om perkolatdannelsen tidsmæssigt sker når det regner eller først forsinket derefter vides ikke. Erfaringsmæssigt, løber der ikke perkolatvand ud af en stak i tørvejr. Det virker sandsynligt, at perkolatet ophobes som våd flis og vaskes ud, når det regner.



Billede 15: Opsamlet perkolat (Foto: Simon Skov)

## Konklusion – perkolat

Der dannes perkolat i flisstakke.

Iagttagelser tyder på, at der dannes "nedløbsrør", hvor flisen er vandmættet i et skarpt afgrænset, bugtende område, hvori vandet løber nedad. "Nedløbsrørene" dannes et stykke under stakkens overflade og munder ud ved bunden af stakken. Denne mekanisme understøttes af den punktvise forekomst af perkolat. Forekomsten af "nedløbsrør" ligner de velkendte "skorstene", der leder varme og damp ud mod overfladen, og bevirker, at der dannes varme, våde og dampende pletter på stakkens overflade. "Skorstene" dannes fra stakkens midte og munder typisk ud på overfladen et par meter under stakkens top.

Der er opsamlet perkolat fra yderst under den våde skal til inderst i den lune og kompakte midte. Der er opsamlet perkolat fra alle tre stakke, dvs. også stakken med presenning. Der er stor variation i mængden og positionen under stakkene.

Der er foretaget 90 prøvetagninger og opsamlet perkolat i 21 af prøverne. Mængden er i alt 4558 ml, hvilket svarer til et gennemsnit på 140 ml perkolat pr. m<sup>2</sup> pr. måned.

Perkolatet er analyseret og sammenlignet med grænseværdier for hhv. "Tilslutning af industrispildevand til offentligt spildevandsanlæg" vejledning nr.2 fra Miljøstyrelsen (VEJ 2), værdier fra Grundvandskvalitetskriteriet fra Miljøstyrelsen (GVK), og "Bekendtgørelse om fastlæggelse af miljømål for vandløb, overgangsvande, kystvande og grundvand" fra Miljøstyrelsens Bekendtgørelse nr. 1070 (BEK1070).

Det ufortyndede perkolat overskrider ikke kravene for udledning af spildevand til kloak (VEJ2), men overskrider flere krav for udledning til overfladevand (BEK1770) og grundvand (GVK).

Den samlede afstrømningen fra flispladsen består af en lille andel perkolat fra bunden af flisstakkene og en langt større andel overfladevand fra nedbør direkte på pladsen. Projektet omfatter ikke måling af den samlede afstrømning og beskriver heller ikke sammenhængen mellem nedbør og perkolat.



Billede 16: Fugtig flis i bunden af stakken. Farvepulver under stakken kunne afsløre om vandet kommer indefra eller udefra. (Foto: Simon Skov)



## Appendix 1

Resultat af soldning jf. V160.

Hvid flis							
Resultat af soldning			Flisklasser				
Navn	Sold	%	Fin	Mellem	Grov	Air Spout	Forgasning
Smuld	< 3.15 mm	3,1	3,07	3,07	3,07	3,07	3,07
			< 10%	< 8%	< 8%	>2%	<4%
Småt	3.15 < X 8 mm	5,9	5,95	5,95	5,95	5,95	5,95
			< 35%	< 30%	< 20%	>5%	<8%
Mellem	8 < X < 16 mm	18,2	0,00	0,00	0,00	84,99	18,17
			<sup>1)</sup>	<sup>1)</sup>	<sup>1)</sup>	>60% <sup>2)</sup>	<25%
Stor	16 < X< 45 mm	66,8	66,82	0,00	0,00	84,99	72,82
			< 60%	<sup>1)</sup>	<sup>1)</sup>	>60% <sup>2)</sup>	>60% <sup>3)</sup>
Ekstra stor	45 < X < 63 mm	6,0	5,99	5,99	0,00	5,99	72,82
			< 2,5%	< 6%	<sup>1)</sup>	<15%	>60% <sup>3)</sup>
Overstor	> 63 mm	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	72,82
			< 0,25%	< 0,6%	< 3%	<3%	>60% <sup>3)</sup>
Overlang 10	100-200 mm	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
			< 1,5%	< 3%	< 6%	<4,5%	<6%
Overlang 20	> 200 mm	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
			0%	< 0,5%	<1,5	<0,8%	<1,5%
Overholdes kravene:			nej	ja	ja	ja	ja

Grøn flis							
Resultat af soldning			Flisklasser				
Navn	Sold	Procent	Fin	Mellem	Grov	Air Spout	Forgasning
Smuld	£ 3.15 mm	2,2	2,22 < 10%	2,22 < 8%	2,22 < 8%	2,22 > 2%	2,22 < 4%
Småt	3.15 < X < 8 mm	5,0	5,01 < 35%	5,01 < 30%	5,01 < 20%	5,01 > 5%	5,01 < 8%
Mellem	8 < X < 16 mm	14,7	0,00 <sup>1)</sup>	0,00 <sup>1)</sup>	0,00 <sup>1)</sup>	84,49 > 60% <sup>2)</sup>	14,69 < 25%
Stor	16 < X < 45 mm	69,8	69,80 < 60%	0,00 <sup>1)</sup>	0,00 <sup>1)</sup>	84,49 > 60% <sup>2)</sup>	78,07 > 60% <sup>3)</sup>
Ekstra stor	45 < X < 63 mm	8,3	8,27 < 2,5%	8,27 < 6%	0,00 <sup>1)</sup>	8,27 < 15%	78,07 > 60% <sup>3)</sup>
Overstor	> 63 mm	0,0	0,00 < 0,25%	0,00 < 0,6%	0,00 < 3%	0,00 < 3%	78,07 > 60% <sup>3)</sup>
Overlang 10	100-200 mm	0,0	0,00 < 1,5%	0,00 < 3%	0,00 < 6%	0,00 < 4,5%	0,00 < 6%
Overlang 20	> 200 mm	0,0	0,00 0%	0,00 < 0,5%	0,00 < 1,5	0,00 < 0,8%	0,00 < 1,5%
Overholdes kravene:			nej	nej	ja	ja	ja

KØBENHAVNS UNIVERSITET

INSTITUT FOR GEOVIDENSKAB  
OG NATURFORVALTNING

ROLIGHEDSVEJ 23  
1958 FREDERIKSBERG

TLF. 35 33 15 00  
IGN@IGN.KU.DK  
WWW.IGN.KU.DK